

Study of disaster risk assessment of road-network focused on hazardous point

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2020-10-30 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/00059761

This work is licensed under a Creative Commons
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0
International License.



博 士 論 文

災害危険箇所に着目した
道路の災害リスク評価に関する研究

Study of disaster risk assessment of road-network
focused on hazardous point

金沢大学大学院自然科学研究科
環境デザイン学専攻

学 籍 番 号 : 1724052002

氏 名 : 大澤 脩司

主任指導教員名 : 高山 純一教授

提 出 年 月 : 2020 年 1 月

目次

第 1 章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 我が国における近年の自然災害による道路被害の事例整理.....	3
1.2.1 東日本大震災における道路被害	4
1.2.2 平成 28 年熊本地震における道路被害.....	7
1.2.3 大阪北部の地震における道路被害.....	8
1.2.4 北海道胆振東部地震における道路被害	9
1.2.5 平成 30 年 7 月豪雨における道路被害.....	10
1.2.6 平成 30 年台風 21 号発生時における道路被害	13
1.2.7 近年の自然災害による道路被害のまとめ.....	15
1.3 研究の目的	17
1.3.1 災害危険箇所および災害危険箇所数の概要と目的の整理.....	17
1.3.2 道路防災対策の検討・立案のための基礎資料に関する定義.....	18
1.3.3 実務への適用性に関する考察の方向性	18
1.4 論文の構成および内容.....	19
第 1 章 参考文献.....	21
第 2 章 既往研究の整理および本研究の位置付け.....	24
2.1 「道路の防災機能の評価手法（案）」の概要.....	24
2.1.1 「道路の防災機能の評価手法（案）」の導入経緯.....	24
2.1.2 「道路の防災機能の評価手法（案）」のフレームワーク.....	25
2.1.3 「道路の防災機能の評価手法（案）」から観る実務への適用性.....	33
2.1.4 「道路の防災機能の評価手法（案）」のフレームワークに関する課題.....	34
2.2 災害時を想定した道路ネットワーク評価に関する研究	34
2.2.1 連結信頼性に関する研究のレビュー.....	35
2.2.2 道路ネットワークの脆弱性評価に関する研究のレビュー	37
2.2.3 道路ネットワークの幾何的構造に基づく評価に関する研究のレビュー.....	38
2.2.4 最適化手法等に基づく最適対策戦略に関する研究のレビュー.....	40
2.3 本研究の位置づけ	41
2.3.1 道路防災対策の方針と相互補完的活用の方向性に関する位置付け.....	42
2.3.2 本研究で提案する手法の実務への適用性に関する位置づけ.....	45

第2章 参考文献.....	46
第3章 災害危険箇所数を指標とした道路の災害リスク評価手法の構築.....	52
3.1 はじめに.....	52
3.2 災害危険箇所の定義とその設定事例.....	52
3.2.1 災害危険箇所の定義.....	52
3.2.2 災害危険箇所の設定事例.....	53
3.3 災害危険箇所数を指標とした道路の災害リスク評価手法のフレームワーク.....	58
3.3.1 災害リスク評価手法としての基本的な考え方とフレームワーク.....	58
3.3.2 道路の災害リスクの評価方法と評価フロー.....	60
3.3.3 単純仮想ネットワークへの適用.....	64
3.4 災害リスク評価手法と災害対応の実施可能性との関係性.....	66
3.5 距離要素の導入方針の検討.....	66
3.5.1 アプローチ1：評価指標への距離要素の導入に関する検討.....	67
3.5.2 アプローチ2：一定の距離水準を満足する制約の付加に関する検討.....	81
3.6 k 番目経路探索の援用による経路距離を考慮した災害危険箇所数を指標とした道路の災害リスク評価手法のフレームワーク.....	82
3.6.1 災害リスク評価手法としての基本的な考え方.....	82
3.6.2 災害リスクの評価方法と評価フロー.....	82
3.6.3 単純仮想ネットワークへの適用.....	85
3.7 おわりに.....	87
第3章 参考文献.....	88
第4章 現実道路ネットワークへの災害危険箇所数を指標とした道路の災害リスク評価手法の適用.....	89
4.1 はじめに.....	89
4.2 ケーススタディの条件設定.....	89
4.2.1 災害リスク評価のための各種条件設定.....	90
4.3 基礎手法に関するケーススタディ.....	95
4.3.1 災害リスク評価結果とその妥当性と特性の分析および考察.....	95
4.4 経路距離を考慮した災害リスク評価手法に関するケーススタディ.....	111
4.4.1 対策注目度の空間分布に関する妥当性の検証.....	112

4.4.2 経路特性に関する基礎手法との比較による提案手法の特性の分析	118
4.5 おわりに	120
4.5.1 基礎手法に関する知見	120
4.5.2 経路距離を考慮した災害リスク評価手法に関する知見	121
第 4 章 参考文献	122
 第 5 章 道路防災対策の検討・立案のための活用メニューの提案とその事例分析	123
5.1 はじめに	123
5.2 石川県緊急輸送道路ネットワークを対象とした事例分析の方法	123
5.3 対策注目度の評価値順の対策箇所設定とその効果確認	124
5.3.1 手法の活用フロー	124
5.3.2 事例分析の結果	125
5.4 対策注目度上位リンクの比較による検討材料の拡充	127
5.4.1 手法の活用フロー	127
5.4.2 事例分析の結果	128
5.5 高災害リスク拠点ペアの抽出と個別対策の検討	132
5.5.1 手法の活用フロー	132
5.5.2 事例分析の結果	133
5.6 おわりに	135
 第 6 章 結論と今後の課題	136
6.1 本研究の結論	136
6.2 提案した道路の災害リスク評価手法の適用条件	138
6.3 今後の課題	139
6.3.1 災害危険箇所数を評価指標とした道路ネットワークの評価手法としての課題	139
6.3.2 災害時を対象とした道路ネットワークの評価手法の運用方法に関する課題	140
6.3.3 道路の強化以外の対策手段の適用に関する課題	140

謝辞

第 1 章 序論

1.1 研究の背景

我が国では、首都直下地震や南海トラフ地震など近い将来に大規模な地震災害が発生することが想定されている。さらに近年では自然災害の激甚化を指摘する声もある。これら背景を踏まえれば、自然災害に可能な限り備えていくことが重要な課題であることは論を俟たない。道路は避難・救助・救援・復旧・復興などの様々な災害対応活動を支える役割を担った重要な施設であり、道路の自然災害に対する機能を高めることはこれら備えの中でも特に重要である。

我が国では過去の大規模な自然災害の教訓を踏まえた道路防災対策が実施されてきた。阪神・淡路大震災では多数の道路被害を受けて緊急輸送ルートが設定されたが、緊急車両のみに通行を規制することは事実上困難であった¹⁾。この教訓を踏まえて、今日では緊急輸送道路が指定されている。東日本大震災では巨大な津波による甚大な道路被害が発生したことを受けて、救援ルートを確保するための道路啓開が実行された²⁾。この経験から、津波被害に備えて事前に道路啓開オペレーション計画が策定されている^{例えば3)}。このように、道路防災対策の必要性が大規模な自然災害の度に唱えられてきた。これを受けて国土交通省は災害時における道路の機能に着目して道路プロジェクトの良し悪しを評価する手法を開発・導入し、今日ではその改定手法にあたる「道路の防災機能の評価手法（案）」^{4),5),6)}が導入・運用されるに至っている。

しかし、近年の自然災害でも道路防災に関する課題は指摘され続けている。平成 28 年熊本地震では跨道橋の落橋や斜面崩壊による道路橋の流出などで緊急輸送道路が通行不能となった⁷⁾。これら重要度の高い道路を含む多数の道路被害を受けて、災害時を想定した道路ネットワークの評価手法の深度化（以下、手法の深度化）が今後の課題の 1 つとして指摘されている⁸⁾。

手法の深度化の目的はより効果的な道路防災対策の検討・立案を可能にすることにある。この目的を達成する手段には 2 つの方向性が考えられる。1 つは単一の優れた手法を構築することであり、もう 1 つは複数の手法を相互補完的に活用することを視野に入れて手法の改良や拡張、新規開発を行なうことである。しかし、現時点では災害の発生予測はもちろん、発災後の被害状況や道路状況を精緻に予測することも困難である。このような中で最適な対策方針を決定することは難しい。また、地域によって実状は様々であり、全ての場合で共通の対策方針を適用することはできない。以上より、単一の手法のみを適用しようとするには限界がある。したがって、対策の検討・立案において、対策方針の異なる複数の手法の分析結果を比較した

上で対策決定に至るようなプロセスも必要であることが指摘される。これを実現するためには複数の手法が相互補完的に利用されることを想定して手法の深度化が進められる必要がある。これを達成するアプローチには、既往手法の改良や拡張、既往手法の効果的な運用方法の模索、対策方針に関する新たな視点を持つ手法の開発などが考えられる。各アプローチに期待される深度化の効果は表- 1.1 の通りである。1 点目・2 点目のアプローチは異なる対策方針を持つ複数の手法に適用することで、3 点目のアプローチはそれ単独で前述したプロセスの実現に寄与できる。なお、ここでの既往手法とは災害時を想定した道路ネットワーク評価手法全般を指す。また、改良や拡張とは、各手法が掲げる対策方針下で、より効果的な対策箇所を提示することを目的として行われる手法のフレームワークや評価指標に対する改良・拡張を指す。

対策方針に関する近年の動向としては、平成 28 年熊本地震での課題を踏まえて幹線道路ネットワークの戦略的かつ効果的な強化の必要性が挙げられている⁹⁾。戦略的な対策を打ち出すためには、その検討のための充実した基礎情報が必要である。さらに、その戦略を実践するためにはこれまでにない対策方針を適用することが必要となる可能性もある。このことから、3 つのアプローチの中でも特に「対策方針に関する新たな視点を持つ手法の開発」が重要である。対策方針としてはこれまで旅行時間や道路ネットワークの構造的弱点などが着目されてきた。一方で、道路被害とそれに伴う道路ネットワークの機能低下は、道路を構成する各施設が持つ被災リスクに起因して発生することを踏まえれば、対策方針として道路の被災リスクに着目することもできる。実際に、隣接する河川の増水や倒木、横断構造物や隣接する建物等の道路沿道に存在する被災リスクをも評価して対策箇所の優先順位を検討する必要があるという提言¹⁰⁾も出されており、新たな対策方針として着目することの意義は大きい。

また、深度化された手法によって効果的な防災対策が立案・実施されることが最終的な目的であることを踏まえると、以上のような方法論としての議論に加えて、手法の適用に係る情報が併せて整理されていることが望ましい。具体的には、道路防災対策の検討・立案のための基礎情報としてどのようなものを提供できるかや、実務への適用性（適用上の留意点）が該当する。前者は分析結果の解釈や対策決定時の資料として、後者は対策の検討・立案への適用の判断材料として活用が期待される。

表- 1.1 手法の深度化のためのアプローチ別 期待される深度化の効果

手法の深度化の アプローチ	既往手法の改良や拡張	既往手法の効果的な 運用方法の模索	対策方針に関する新たな 視点を持つ手法の開発
期待される 深度化の効果	その手法が持つ対策方針のもとで、対策効果がより大きい箇所が把握可能になる	分析の条件設定の自由度拡大によるシナリオ設定の充実化と、対策の検討・立案のための基礎情報の拡充	適用する対策方針の自由度の拡大や、異なる視点の手法との併用による対策の検討・立案のための基礎情報の拡充

1.2 我が国における近年の自然災害による道路被害の事例整理

本節では、我が国で近年に発生した自然災害の際に生じた道路被害について、その概要を整理する。さらに、これを踏まえて前節に述べた「道路が被災するリスクを評価して対策箇所の優先順位を検討する」ことについて、その意義と目的に関する考察を加える。ここでは、先に述べた提言¹⁰⁾の背景となった自然災害¹¹⁾のうち、道路に被害を生じた6つの自然災害を対象とする。なお、各自然災害の概要は表-1.2と表-1.3に整理するとおりである。

表-1.2 本節で対象とする4つの地震災害の概要¹²⁾

No.	発生日月	震央地名・地震名	M	最大震度	津波	人的被害	物的被害
1	平成23年3月11日	三陸沖 平成23年東北地方太平洋沖地震 (東日本大震災)	9	7	9.3 m 以上	死：19,689 不明：2,563 負：6,233	住家全壊：121,995棟 住家半壊：282,939棟 住家一部破損：748,109棟 など
2	平成28年4月14日～	熊本県熊本地方など 平成28年熊本地震	7.3	7	-	死：273 負：2,809	住家全壊：8,667棟 住家半壊：34,719棟 住家一部破損：162,500棟 など
3	平成30年6月18日	大阪府北部	6.1	6弱	-	死：6 負：462	住家全壊：21棟 住家半壊：483棟 住家一部破損：61,266棟 など
4	平成30年9月6日	胆振地方中東部 平成30年北海道胆振東部地震	6.7	7	-	死：43 負：782	住家全壊：469棟 住家半壊：1,660棟 住家一部破損：13,849棟 など

※死は死者数を、負は負傷者数を、不明は行方不明者数をそれぞれ示す。

表-1.3 本節で対象とする3つの豪雨・豪雪の概要^{(13), (14)}をもとに筆者作成)

No.	発生日月	災害をもたらした気象事例	概要	人的被害	物的被害
5	平成30年6月28日～7月8日	平成30年7月豪雨 (前線及び台風第7号による大雨等)	西日本を中心に全国的に広い 範囲で記録的な大雨。	死：224 不明：8 負：459	住家全壊：6,758棟 住家半壊：10,878棟 住家一部破損：3,917棟 床上浸水：8,567棟 床下浸水：21,913棟 など
6	平成30年9月3日～9月5日	台風21号による暴風・高潮等	西日本から北日本にかけて暴 風。特に四国や近畿地方で顕 著な高潮。	死：14 負：954	住家全壊：26棟 住家半壊：189棟 住家一部破損：50,083棟 床上浸水：66棟 床下浸水：505棟 など

※死は死者数を、負は負傷者数を、不明は行方不明者数をそれぞれ示す。

1.2.1 東日本大震災における道路被害

東日本大震災では高速道路 15 路線，直轄国道 69 区間，補助国道 102 区間，県道等 540 区間で通行止めとなった（表-1.4）．特に，宮城県仙台市から三陸沿岸地域を縦走する国道 45 号をはじめ，東北地方の太平洋側一帯沿岸部が甚大な被害を受けた¹⁵⁾．以下，「東日本大震災合同調査報告 土木編 4 交通施設の被害と復旧」¹⁶⁾をもとに道路被害の概要を整理する．

表-1.4 東日本大震災における道路区分別の通行止め件数¹⁵⁾

道路区分	高速道路	直轄国道	補助国道	県道等
通行止め件数	15 路線	69 区間	102 区間	540 区間

高速道路における路線別の被災箇所数一覧を表-1.5 に示す．本表より，土工・舗装・橋梁に関する被害が特に多いことが分かる．被害は地震の揺れによる直接的な被害と津波による被害に分類される．地震の揺れによる直接的な被害の要因は，土工・舗装での広範囲に及ぶクラックや段差，盛土・切土部の崩落，橋梁では支承の破断や鋼桁のズレ，伸縮装置の破損，通信ケーブルの破断などであった．一方，津波による被害としては，浸水や瓦礫の漂着，車両の漂着，立入防止柵の倒壊などがあったが，高速道路本体への被害は盛土のり尻の洗掘等の軽微なものに留まった．

表 - 1.5 路線別被災箇所数一覧¹⁶⁾

	土工	舗装	橋梁	TN	BOX	その他
東北道	432	1,326	255	1	122	191
関越道						1
常磐道	166	270	140		65	140
山形道	46	304	28		42	6
磐越道	36	105	7		4	
東北中央道						
仙台東部道	45	420	205	3	37	30
仙台北部道	80	39	256		15	9
三陸道		35	59			
秋田道			14			
北関東道	34	213	19		17	11
東水戸道	5	45	55		6	11
東関東道	78	49	58		19	90
上信越道		2				
館山道		1		1		
東京外環道			3			2
圏央道	11	6	6			7
アクトライン	1					
京葉道路	10	14	20		1	16
富津館山道				1		
第三京浜			5			
横横道			2			
横浜新道			3			
計	944	2,829	1,135	3	328	514

直轄国道である国道6号、45号の被害は、津波浸水約101Km、落橋5橋（津波による流出）、通行止め66箇所であった。このうち国道45号は通行止めが41箇所と被害が集中しており、被災の内訳は地震動による被災が5箇所に対して津波による被災が71箇所と圧倒的に多くなっている（表-1.6）。なお、津波による橋梁等の被災要因は、上部工の流出や橋台背面盛土の流出等であった。

表-1.6 国道45号の被災状況（箇所）¹⁶⁾

	岩手県内	宮城県内	計
通行止め（区間）	25	16	41
津波による道路流出	25	46	71
土工部	23	43	66
橋梁（落橋）	2	3	5
地震動による被害	1	4	5
法面崩壊	1	4	5
落橋	0	0	0

岩手県管理道路では473箇所の被害（道路部446箇所、橋梁27橋）が生じた。被害要因は、路面亀裂・陥没・段差等の路面損傷が70%と最も多く、次いで地震や津波による斜面崩壊の14%、津波による路面・道路の流失と橋梁損傷がそれぞれ6%、地盤沈下による道路冠水が2%、防護柵や雪崩防止柵等のその他道路施設が2%の割合となっている。

宮城県管理道路では道路の被害が1,437箇所、橋梁の被害が128橋であった。被害要因は主に路面の亀裂や沈下・陥没等であった。沿岸市町の道路では津波による浸水で道路の流出が多発するとともに、橋梁では津波外力や橋桁への船舶等の衝突による落橋等の被害が生じた。また、地震に起因する広域的な地盤沈下の影響で潮位の変動に伴って冠水する区間も多発した。

福島県管理道路では、被害による通行止め箇所は107路線168箇所に達した。主な被害要因は切土法面や盛土部の崩壊、舗装面の亀裂や段差などの被害であった。また、沿岸部では津波によって多くの道路が流出し、橋梁についても流出または破損等の大きな損傷を生じた。

茨城県管理道路では328箇所（道路部290箇所、橋梁38橋）の被害を生じた。被害要因は、段差・亀裂等の路面損傷が80.5%、橋梁の損傷が11.6%、落石・法面崩壊が3.0%、液状化による損傷が2.1%であった。

これら道路被害および津波による港湾機能の喪失によって、復旧活動は内陸側から進める以

外に方法が存在しなかった。そこで、第 1 ステップとして東北自動車道と国道 4 号の復旧が行われ、第 2 ステップとしてこれら南北軸から海岸へ向かう国道及び主要地方道の確保が進められた。そして第 3 ステップとして太平洋沿岸の国道 6 号と 45 号の啓開が進められた。以上が、今日では「くしの歯作戦」と呼ばれる道路啓開の概要である。このように早期に輸送路を確保できたことは評価すべき点であり、この経験が今日における事前の道路啓開計画の策定に活かされている。一方で、以下のような課題も指摘された¹¹⁾。

- 1) ミッシングリンク等により高速道路が本来果たすべきネットワークとしての機能に課題
- 2) 災害時も想定した物資輸送の拠点となる港湾・空港などとの連絡確保に課題
- 3) 高速道路の構造（盛土）の耐震性に課題

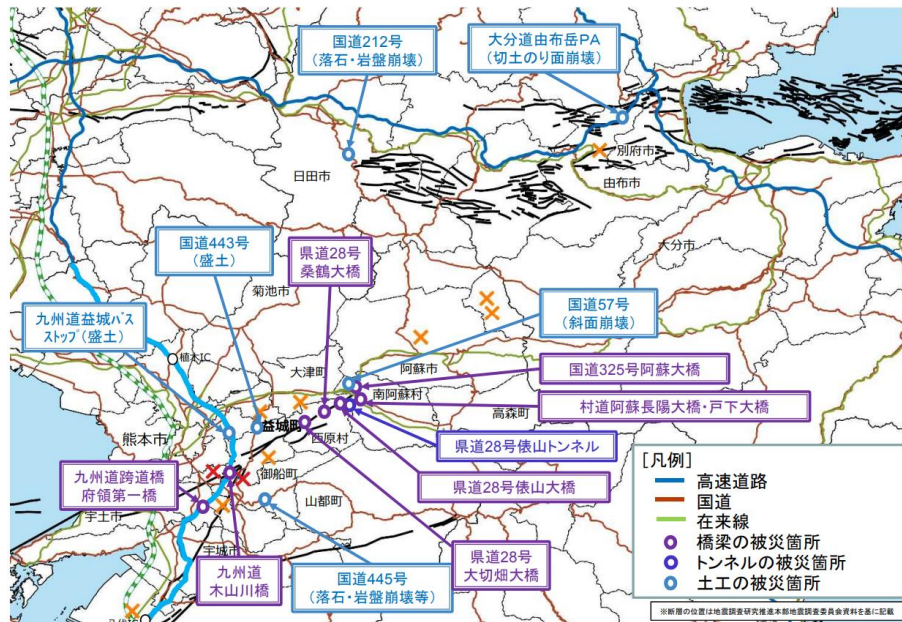
これら課題に対して、戦略的かつ効果的なネットワークの強化によって、幹線道路ネットワークの弱点解消や大震災が想定される地域等の再点検などに取り組む必要があるとされた¹¹⁾。

1.2.2 平成 28 年熊本地震における道路被害

平成 28 年熊本地震では、高速道路 7 路線、緊急輸送道路 50 箇所で行き止まりが発生し、これらに一般道路を含めると約 200 箇所の行き止まりが発生した^{11), 17)}。高速道路における被害の要因は、盛土法面崩落、跨道橋落橋、切土法面の崩壊、橋梁の損傷（上部、下部構造の損傷や支承部の損傷）などであった。一般道路では斜面崩落による落橋や流出、トンネル覆工コンクリートの崩落、盛土崩壊、落石・岩盤崩壊、橋梁の損傷（支承部の損傷や橋台の損傷、ジョイント部での段差や損傷など）、電柱の倒壊などによって多数の行き止まりが発生するに至った。図-1.1 に主な被災状況を示す。国土技術政策研究所の資料¹⁸⁾によると、震度 6 弱以上を観測した地域の橋梁全 15,689 橋のうち、被災橋梁は 182 橋であった。また、土工関係被災による行き止まり箇所数は、地震直後に 93 箇所であり、その内訳は表-1.7 に示す通りであった。

以上のように緊急輸送道路の橋梁や緊急輸送道路を跨ぐ橋梁に被害が生じたことで、早期復旧ができない事態が発生した。また、応急復旧に必要な資機材の融通がうまくいかず、応急復旧にも時間を要することとなった。特に阿蘇地域では、東西軸の路線が同時に行き止まりとなり、熊本地域からの救援・物資輸送が困難となった。市街地では電柱の倒壊や傾斜によって救急救援活動や救援物資の輸送、復旧作業に支障が生じる事態も発生した。

これら課題を踏まえれば、道路ネットワークの強化（道路ネットワーク機能の確保）の必要性が指摘される。このためには、これまでにとられてきた対策方針だけでなく、これまで考慮されてこなかった道路の被災リスク（電柱の倒壊、道路沿道や横断構造物の倒壊・損傷など）を踏まえた新たな対策方針とそれに適合した道路ネットワークの評価手法が必要である。

図-1.1 平成 28 年熊本地震における道路の主な被災状況¹⁷⁾表-1.7 土工関係被災による地震直後の通行止め箇所数¹⁸⁾

事象	緊急輸送 道路	緊急輸送 道路以外	計
土工	46 (50%)	47 (50%)	93
斜面崩壊	40 (51%)	38 (49%)	78
切土のり面崩壊	4 (44%)	5 (56%)	9
盛土崩壊	2 (33%)	4 (67%)	6

1.2.3 大阪北部の地震における道路被害

内閣府が公表している「大阪府北部を震源とする地震に係る被害状況等について」¹⁹⁾によれば、地震発生直後は点検に伴って、NEXCO 西日本管理の高速道路で 11 路線 12 区間（延長 263Km）が、阪神高速では全線が通行止めとなった。同様に箕面有料道路、第二阪奈道路、山麓バイパスも通行止めとなった。ただし、地震発生翌日（平成 30 年 6 月 19 日）7 時時点でいずれの区分の道路においても通行止めを伴う道路被害は（高速道路、直轄国道、補助国道、都道府県道・政令市道では）確認されなかった。ただし、路面の亀裂や橋梁ジョイント部の盛り上がり等、通行止めを伴わない道路被害は確認されている。一方で、地震発生時刻が通勤時刻と重なっており、高速道路の通行止めが一般道での広範囲な渋滞発生につながった¹¹⁾。

1.2.4 北海道胆振東部地震における道路被害

内閣府が公表している「平成 30 年北海道胆振東部地震に係る被害状況等について」²⁰⁾をもとに、本地震における道路被害の概要を整理する。

高速道路では、地震発生直後に 4 路線 4 区間が点検に伴って通行止めとなったが、地震発生翌日（平成 30 年 9 月 7 日）の 6 時 30 分時点ではその通行止めは解除されている。ただし、道東自動車道（夕張 IC～十勝清水 IC）では路面損傷によって発災直後から通行止めとなった。また、高速道路の通行止めは最大で約半分（延長 358Km）にのぼった。

直轄国道については、被災による通行止めは報告されていない。

道道・政令市道の被害概要を表-1.8 に示す。路線名が記載されておらず、重複を避けて通行止め区間数を集計することが困難なため、報告日特別に集計した。表-1.8 より、道道・政令市道で確認された通行止めの要因は土砂崩れ、液状化（による水道管破裂）、路面隆起、橋梁損傷、倒木、路面損傷の 6 要因である。最も多いのは土砂崩れであり、橋梁損傷が次いで多い。

本地震における特徴的な事例として、地震発生直後の北海道全域での停電の発生（ブラックアウト）によって道路照明やトンネル照明、CCTV カメラなどの外部電源を要する道路施設が機能を停止したことで、迅速に被災状況を把握できない事態が発生したことが挙げられる¹¹⁾。また、この停電によって一般道の信号機も停電したことで IC から一般道に出られない事態となり、高速道路の通行止めが長期化する要因となった。

表-1.8 北海道胆振東部地震における道道・政令市道の被害概要

報告日時	土砂崩れ		液状化による 水道管破裂		路面隆起		橋梁損傷		倒木		路面損傷		合計 区間数
	区間数	割合	区間数	割合	区間数	割合	区間数	割合	区間数	割合	区間数	割合	
9月6日(9時30分)	1	100.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	1
9月6日(14時00分)	1	33.3%	1	33.3%	1	33.3%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	3
9月7日(6時30分)	8	50.0%	1	6.3%	2	12.5%	4	25.0%	1	6.3%	0	0.0%	16
9月7日(14時00分)	10	47.6%	1	4.8%	2	9.5%	6	28.6%	1	4.8%	1	4.8%	21
9月8日	9	52.9%	1	5.9%	2	11.8%	4	23.5%	1	5.9%	0	0.0%	17
9月9日	9	56.3%	1	6.3%	1	6.3%	4	25.0%	1	6.3%	0	0.0%	16
9月10日	9	60.0%	1	6.7%	1	6.7%	3	20.0%	1	6.7%	0	0.0%	15
9月11日	8	61.5%	1	7.7%	1	7.7%	2	15.4%	1	7.7%	0	0.0%	13
9月12日	8	61.5%	1	7.7%	1	7.7%	2	15.4%	1	7.7%	0	0.0%	13
9月13日	9	69.2%	1	7.7%	1	7.7%	2	15.4%	0	0.0%	0	0.0%	13
9月14日	9	64.3%	1	7.1%	1	7.1%	2	14.3%	0	0.0%	1	7.1%	14
9月18日	8	66.7%	1	8.3%	0	0.0%	2	16.7%	0	0.0%	1	8.3%	12
9月19日	7	63.6%	1	9.1%	0	0.0%	2	18.2%	0	0.0%	1	9.1%	11
9月20日	7	70.0%	1	10.0%	0	0.0%	2	20.0%	0	0.0%	0	0.0%	10
9月25日	7	70.0%	1	10.0%	0	0.0%	2	20.0%	0	0.0%	0	0.0%	10
9月27日	7	70.0%	1	10.0%	0	0.0%	2	20.0%	0	0.0%	0	0.0%	10
10月5日	6	66.7%	1	11.1%	0	0.0%	2	22.2%	0	0.0%	0	0.0%	9
10月29日	5	71.4%	1	14.3%	0	0.0%	1	14.3%	0	0.0%	0	0.0%	7
(平成31年)1月28日	3	75.0%	1	25.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	4

1.2.5 平成 30 年 7 月豪雨における道路被害

(1) 中国地方における道路被害

国土交通省中国地方整備局が公表している「平成 30 年 7 月豪雨～中国地方整備局 災害対応の記録～」²¹⁾をもとに、本豪雨時の中国地方における道路被害を整理する。

中国地方における通行止め状況の推移は図-1.2 に示すとおりである。また図-1.3 に直轄国道における通行止め状況を示した。発災直後は膨大な数の通行止めが生じていたが、1 週間後にほぼ半減し、2 週間後には発災直後の約 40% 程度まで通行止め箇所は減少するが、それ以降は通行止め解除の進捗が落ち、半年後の 12 月末時点で 100 箇所以上の通行止めが続いている。図-1.3 や資料に記載された情報からは、道路の被災・通行止め要因の大半は土砂災害によるもので、その要因は土砂崩落、土砂流出、法面崩落、土砂流入などである。また、土砂災害以外にも倒木、路面冠水、洗掘（車道洗掘、護岸洗掘）、護岸崩落などによる被害・通行止めも生じている。これら要因の多くは道路沿道、道路区域外に存在する脆弱性に起因するものである。

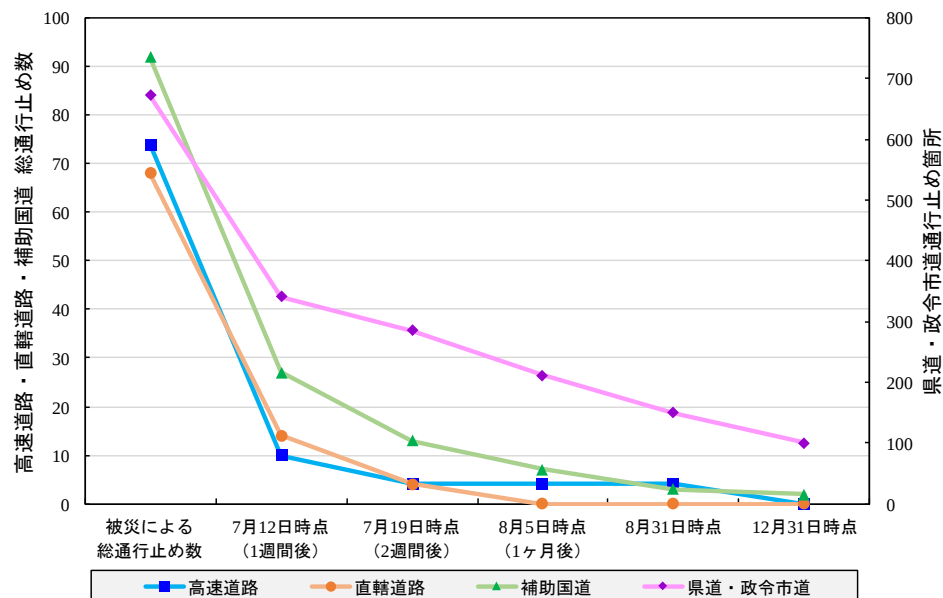
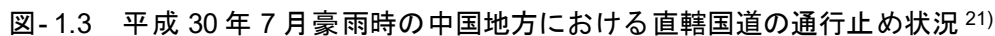


図-1.2 平成 30 年 7 月豪雨時の中国地方における道路の通行止め状況の推移
(文献 21) をもとに筆者作成)



(2) 四国地方における道路被害

国土交通省四国地方整備局が公表している「平成30年7月豪雨～四国地方の道路被害と対応～」²²⁾をもとに、本豪雨時の四国地方における道路被害を整理する。

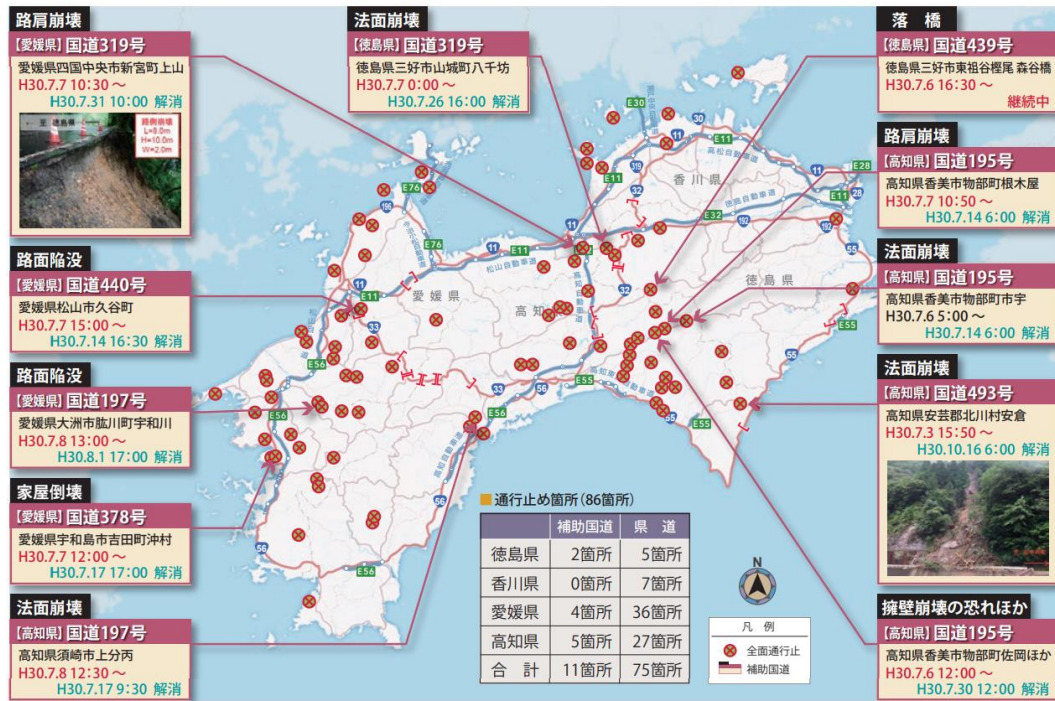
四国地方における道路被害および通行止めの状況は表-1.9に示すとおりである。また、図-1.4に高速道路・直轄国道における通行止め状況を、図-1.5に補助国道・県道における通行止め状況を示した。これら2つの図より、道路の主な被災要因（通行止め要因）は土砂災害であることが分かる。要因の内訳としては法面崩壊・土砂流入・路肩崩壊・擁壁崩壊のおそれなどである。また、土砂災害以外にも落橋や路面陥没、斜面崩壊による橋梁流出、路面冠水などによる被害・通行止めも生じている。これら要因は路面陥没を除けば道路沿道、道路区域外に存在する脆弱性に起因するものである。

表-1.9 平成30年7月豪雨時の四国地方における道路の被災・通行止め状況²²⁾

	高速道路	直轄国道	補助国道	県道
被災箇所数	5	7	30	117
通行止め	396.6 Km (57.1%)	128.2 Km (10.7%)	11 箇所	75 箇所



図-1.4 平成30年7月豪雨時の四国地方における高速道路・直轄国道の通行止め状況²²⁾

図-1.5 平成30年7月豪雨時の四国地方における補助国道及び県道の通行止め状況²²⁾

(3) 平成30年7月豪雨における道路被害のまとめ

高速道路では特に道路区域外からの流木・土砂等の流入による被害が多数発生した。直轄国道における被害も同様の様相を呈している。一般道では全国32の道府県で1,100を超える箇所が被災し、各地で橋梁流出、法面崩落、土砂流出、路面冠水等が発生した。また、広島と呉の間では鉄道と高速道路が被災したことで都市間の移動が大幅に制限される事態となった。復旧した国道31号に交通が集中する中、災害時BRTの運行や交通需要抑制等の交通マネジメントが実施された。さらに、中山間地域では孤立集落も発生した。以上を踏まえると、重要な路線が被災・通行止めとなった際の影響は非常に大きく、道路区域外に存在する脆弱性をはじめ、各種道路の被災リスクを道路ネットワーク評価の際に考慮した上で、それらを踏まえた対策の優先度検討と対策の実施が重要であると言える。

1.2.6 平成30年台風21号発生時における道路被害

内閣府が公表している「平成30年台風第21号に係る状況等について」²³⁾をもとに、本台風における道路被害の概要を整理する。表-1.10に本台風における高速道路・直轄国道・補助国道の被害概要として、通行止め要因と通過止め区間数を整理した。また、同様に表-1.11には

都道府県道・政令市道の被害概要を整理した。なお、資料に路線名が記載されておらず、重複を避けて通行止め区間数を集計することが困難なため、被害状況の報告日ごとに集計した。

表-1.10より、高速道路における通行止め要因の大半は強風による通行止めであった。一方で、これを除けば倒木が最も多い。また、直轄国道では倒木や落石、斜面崩壊、電柱倒壊といった道路沿道にある脆弱性に起因した被害が生じた。補助国道では高速道路や直轄国道と比較して通行止め区間数が多く、その要因は倒木が圧倒的に多い。高速道路や直轄国道にみられなかった要因として崩土、土砂流出、障害物、法面崩壊、土砂崩落、路面陥没が確認できる。これら要因の多くは道路沿道にある脆弱性に起因するものである。

都道府県道・政令市道（表-1.11）について、通行止め要因は倒木が最も多く、次いで電柱倒壊や崩土、路面冠水、落石が多い。要因自体は高速道路、直轄国道、補助国道と共通している。

以上を整理すると、倒木や土砂災害によって高速道路9区間、直轄国道8区間、補助国道43区間が被災し、通行止めとなった。また、電柱の倒壊が多数発生したことで救急救援活動に支障が生じたことが確認されている¹¹⁾。ここでも道路区域外にある脆弱性（道路の被災リスク）をどのように捉え、それらを踏まえた対策の優先度検討や対策の実施が重要であると言える。

表-1.10 平成30年台風21号発生時における高速道路・直轄国道・補助国道の被害概要

要因	高速道路		直轄国道		補助国道	
	区間数	割合	区間数	割合	区間数	割合
強風による通行止め	41	82.0%	0	0.0%	0	0.0%
降雨による通行止め	1	2.0%	0	0.0%	0	0.0%
倒木	5	10.0%	4	50.0%	31	75.6%
電柱倒壊	0	0.0%	1	12.5%	1	2.4%
落石	0	0.0%	1	12.5%	0	0.0%
土砂流出	0	0.0%	0	0.0%	3	7.3%
崩土	0	0.0%	0	0.0%	2	4.9%
法面崩壊	1	2.0%	0	0.0%	1	2.4%
土砂崩落	0	0.0%	0	0.0%	1	2.4%
斜面崩壊	0	0.0%	1	12.5%	0	0.0%
路面陥没	0	0.0%	0	0.0%	1	2.4%
障害物	0	0.0%	0	0.0%	1	2.4%
落石及び倒木	0	0.0%	1	12.5%	0	0.0%
倒木及び遮音壁の損傷	1	2.0%	0	0.0%	0	0.0%
船舶衝突による橋桁の損傷	1	2.0%	0	0.0%	0	0.0%
合計：	50		8		41	

表-1.11 平成30年台風21号における都道府県道・政令市道の被害概要

要因	9月5日		9月6日		9月14日		10月2日	
	区間数	割合	区間数	割合	区間数	割合	区間数	割合
倒木	69	67.6%	58	71.6%	10	58.8%	3	42.9%
電柱倒壊	9	8.8%	6	7.4%	0	0.0%	0	0.0%
崩土	6	5.9%	4	4.9%	2	11.8%	1	14.3%
路面冠水	5	4.9%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%
落石	4	3.9%	3	3.7%	0	0.0%	0	0.0%
法面崩落	2	2.0%	2	2.5%	1	5.9%	0	0.0%
小屋倒壊	1	1.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%
民地からコンテナ流出	1	1.0%	1	1.2%	0	0.0%	0	0.0%
土砂崩落	1	1.0%	0	0.0%	1	5.9%	0	0.0%
路面陥没	1	1.0%	3	3.7%	1	5.9%	1	14.3%
信号機倒壊	1	1.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%
路肩崩壊	1	1.0%	2	2.5%	2	11.8%	2	28.6%
法面崩壊	1	1.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%
土砂流出	0	0.0%	2	2.5%	0	0.0%	0	0.0%
合計：	102		81		17		7	

1.2.7 近年の自然災害による道路被害のまとめ

以上に整理したように、近年の自然災害において多様な道路被害が発生している（図-1.6）。これら道路被害によって、救急救援活動や復旧活動、救援物資の輸送等の災害対応の阻害、大規模な渋滞の発生、孤立集落の発生、長期の通行止めによる日常生活への影響など様々な影響が生じている。道路への適切な備えがなされない場合、近い将来発生すると想定されている首都直下地震や南海トラフ地震等の大規模な自然災害が発生した際に同様の被害・影響が発生することは想像に難しくない。大規模な自然災害であれば、被害や影響の度合いはここに示した事例を上回る可能性さえ考えられる。したがって、道路ネットワークの自然災害に対する機能を向上させることは、今後の自然災害における被害・影響を軽減する上での重要な課題である。その解決方策の1つが、まさに平成28年熊本地震を受けて指摘された「道路ネットワークの評価手法の深度化」⁸⁾である。そして、この方向性を検討する上で重要な事実が、多様な要因で道路被害が発生し、それによる様々な影響が生じているということである。これを踏まえれば、効果的に道路ネットワークを強化するためには、提言¹⁰⁾でも指摘されているように、これら道路の被災リスクが評価の中で考慮される必要がある。ここで再度被災事例を俯瞰すれば、各種道路構造物本体に起因する被災リスクはもちろんのこと、道路区域外に起因する斜面災害、隣接する河川の増水、倒木、電柱の倒壊、道路沿道あるいは横断構造物の倒壊・損傷など、道路沿道に存在する道路の被災リスクを考慮することの重要性が改めて確認できる。

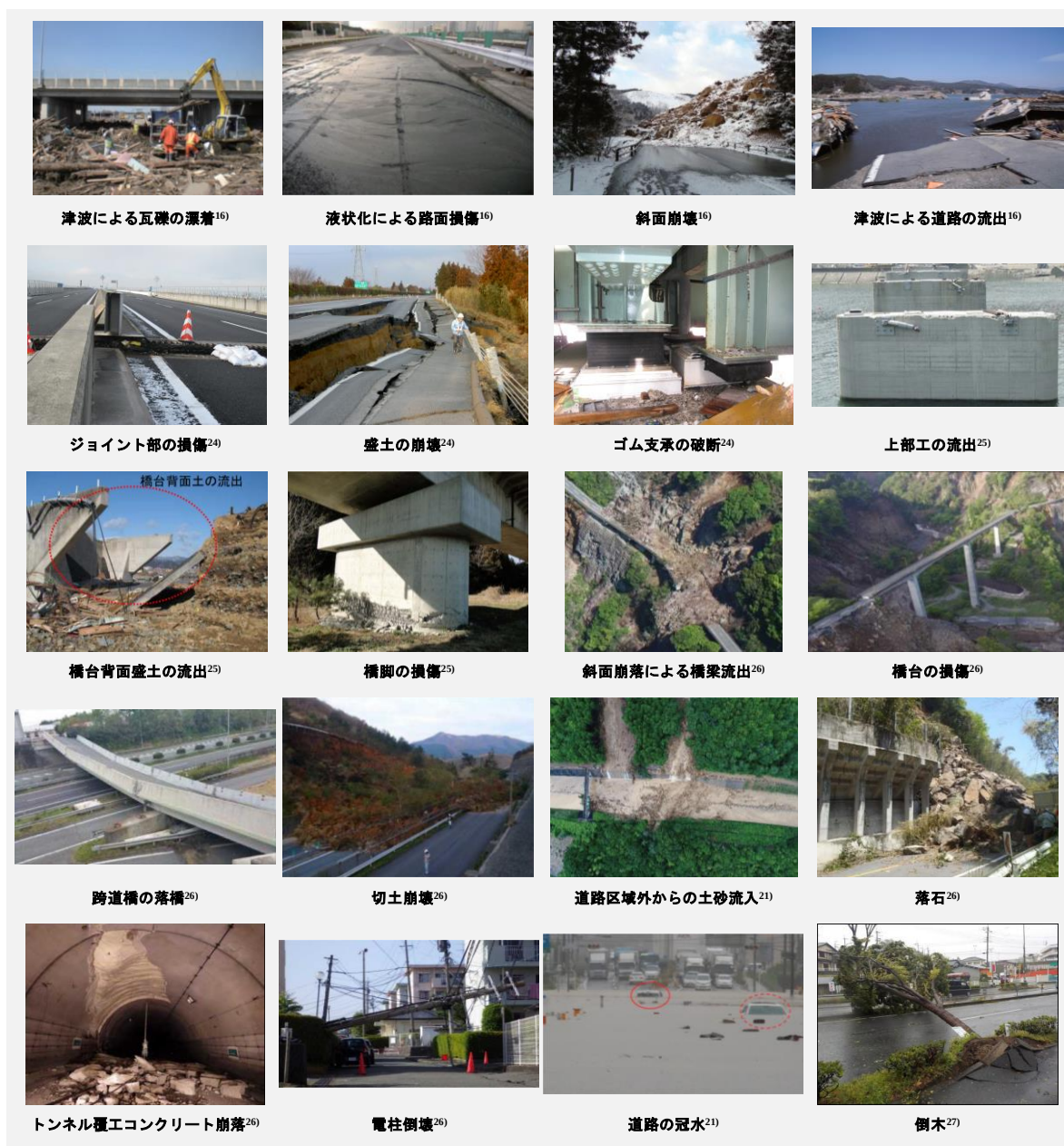


図-1.6 近年の自然災害における道路の被害事例

1.3 研究の目的

本研究では手法の深度化という課題に対して、「対策上の新たな視点を持つ手法の開発」のアプローチで取り組むものである。対策上の視点としては、近年の自然災害での教訓を踏まえた提言¹⁰⁾および前節で整理した道路被害とその影響の事例を踏まえ、「道路の被災リスク」に着目する。このような目的を達成するためには、前節に挙げたような道路沿道まで含めた多様な道路の被災リスクを扱いうるフレームワークを持つ評価手法を開発する必要がある。さらに、そこで扱われる被災リスクはその大小をもが考慮される必要がある。災害時を想定した道路ネットワーク評価の分野で古くから研究されている連結信頼性評価の考え方自体は、こうした要請を満たしうるものである。しかし、「リンク信頼度をいかに定めるか？」が近年の研究でも依然として重要な課題として挙げられており、前節に挙げたような様々な道路の被災リスクを連結信頼性評価の枠組みの中でどのように扱うべきかという知見は未だ得られていない。例えば倒木や電柱の倒壊のように道路被害のリスクとなる要素としては認識されていても、多くの要素について、それを信頼度として評価する手法が確立されていないのが現状である。その背景にあるのが被害率関数を構築することの困難さである。リンク信頼度の算出に取り組んだ研究ではいずれも被害率関数が援用されている。被害率関数はその被害がどのようなメカニズムで生じているかが理解されない限り構築できないが、前節に挙げたような被害のメカニズムには未知な部分が多い。これが信頼度をいかに定めるかの議論を停滞させる要因となっている。そこで、本研究では信頼度とは異なる見方・考え方で道路の被災リスクを捉えることを提案する。具体的には、「道路被害のリスクとなる要素としては認識されているもの自体は多い」ことに着目して、道路ネットワークの評価指標として災害危険箇所数という指標を提案するとともに、これに基づく評価手法を開発する。また、開発した手法に対して、基礎資料として提供できる情報の整理、実務への適用性に関する考察も併せて行なう。以上のような本研究の目的に対応して、本節ではそのキーポイントとなる概念や定義について整理する。

1.3.1 災害危険箇所および災害危険箇所数の概要と目的の整理

災害危険箇所は「分析者が道路被害のリスクがあると認識している箇所」と定義する。これは道路被害のリスクに対する分析者の認識次第で任意に設定されることを許容するものである。災害危険箇所数とは災害危険箇所の数をリンクや経路の単位で集計したものである。以上の定義により、「分析者が認識している限りの」という条件が付くが、災害危険箇所数は道路ネットワーク上の災害リスクに相当する評価指標であると解釈できる。本指標は、道路被害が生じる可能性という視点では連結信頼性のリンク信頼度と比べて精度は落ちるものの、連結信頼性の

枠組みでは扱えなかったリスクを考慮したネットワーク評価が可能となる。これによって、提言¹⁰⁾で指摘されたような道路沿道まで含めた道路の被災リスクを評価して対策箇所の優先順位を検討することへ寄与することが期待できる。

多くの既往手法では評価指標として旅行時間や幾何的構造などが採用されている。これは防災対策上の視点（考え方）としては「旅行時間の改善による道路ネットワークの機能向上」と「構造的な弱点部への対策による道路ネットワークの接続性向上」に対応している。これらに対して、災害危険箇所数に対応する視点は、「共通するリスクへの対策による道路ネットワークの接続性の向上」と定義する。これは、災害危険箇所を効率的に取り除くことができれば、災害リスクを低減して道路ネットワークの接続性を向上できると考えられることに基づいている。なお、既往手法の方針でもリスクは低減できるが、それは副次的な効果である。ここでは主効果としてのリスク低減に着目するため、リスク低減に対する考え方が異なる。

1.3.2 道路防災対策の検討・立案のための基礎資料に関する定義

道路防災対策の検討・立案のための基礎資料として特に重要なものとして、対策の効果や優先度、注目度が考えられる。これらは各手法の評価指標に相当する。評価指標は様々な要素の集合体であり、その要素が基礎資料として提供される情報となる。評価指標は1つの値として算出されるが、そこに至るまでには複数の過程を経る必要がある。そして、その過程1つ1つが評価指標に盛り込まれた要素に対応すると考えられる。したがって、それら評価過程の全体像にあたる評価手法のフレームワークから、基礎資料として提供可能な情報の整理を行なう。

1.3.3 実務への適用性に関する考察の方向性

実務での適用を妨げる要因としては、実際規模の道路ネットワークでの計算の困難性や、手法適用のための各種条件設定に伴う困難性が一般的に考えられる。前者は実務で対象とされる現実規模の道路ネットワークでの評価が実行困難な状態を指す。後者は実務で適用する上での十分な設定根拠を提示することが困難な状態を指す。これらについては第2章で、実務で活用されている国交省の手法を参考に、本研究で提案する手法の実務への適用性として考察する。

1.4 論文の構成および内容

本論文は全 6 章で構成される（図- 1.7）。以下に各章の概要を整理する。

第 1 章「序論」では本研究の背景と目的を示すとともに、研究の全体構成と概要を述べる。

第 2 章「既往研究の整理および本研究の位置付け」では、「道路の防災機能の評価手法（案）」のレビューを通して、実務への適用性を整理するとともに、課題点から基礎情報の充実化につながる情報の獲得を目指す。加えて災害時を想定した道路ネットワーク評価に関連する既往研究をレビューし、これら既往手法と既往研究を踏まえた本研究の位置付けを明らかにする。

第 3 章「災害危険箇所数を指標とした道路の災害リスク評価手法の構築」では、「共通するリスクへの対策による道路ネットワークの接続性向上」を対策方針に掲げた、災害危険箇所数を指標とする 2 つの災害リスク評価手法を構築する。1 つは災害対応の実施可能性のうち「対応実施の確実性」に着目した手法（災害危険箇所数を指標とした道路の災害リスク評価手法）であり、もう一方は「対応実施の確実性」に加えて「対応の迅速性」にも着目した手法（経路距離を考慮した災害危険箇所数を指標とした道路の災害リスク評価手法）である。これら 2 手法をそれぞれ単純仮想ネットワークに適用し、提案手法の挙動確認を行なうとともに、提案手法による評価の全体像を解説する。

第 4 章「現実道路ネットワークへの災害危険箇所数を指標とした道路の災害リスク評価手法の適用」では、実際の道路ネットワーク・地域防災計画を対象としたケーススタディを行い、手法の妥当性の検証および特性の把握を行なう。具体的には、石川県の緊急輸送道路ネットワークと地域防災計画を対象としたケーススタディを行なう。また、ケーススタディは 2 つの提案手法それぞれに対して実施する。ただし、2 つの手法のうち拡張手法にあたる「経路距離を考慮した災害危険箇所数を指標とした道路の災害リスク評価手法」については、手法単独での妥当性の検証に留まらず、基礎手法と分析結果を比較した場合における妥当性の検証も行なう。

第 5 章「道路防災対策の検討・立案のための活用メニューの提案とその事例分析」では、提案した手法の活用メニューを提案するとともにその事例を示す。提案した活用メニューは対策注目度の評価値順の対策箇所設定とその効果確認、対策注目度上位リンクの比較による検討材料の拡充、高災害リスク拠点ペアの抽出と個別対策の検討の 3 種類である。

第 6 章「結論と今後の課題」では本研究の成果を総括し、今後の課題を整理する。

第1章 序論

- ・ 研究の背景・近年の自然災害による道路被害の事例整理・研究の目的・論文の構成

第2章 既往研究の整理および本研究の位置付け

- ・ 道路の防災機能評価手法（案）について
- ・ 災害時を想定した道路ネットワークの評価に関する研究
- ・ 本研究の位置付け

第3章 災害危険箇所数を指標とした道路の災害リスク評価手法の構築

- ・ 災害危険箇所の定義と設定事例の提示。
【災害対応実施の確実性向上の視点（基礎手法）】
「災害危険箇所数を指標とした道路の災害リスク評価手法」
 - ・ 災害危険箇所数をネットワークコストとした各拠点ペアの経路抽出、各リンクの通過経路数と災害危険箇所数との比率による対策注目度の提案。**【災害対応実施の確実性向上と対応の迅速性確保の2視点】**
「経路距離を考慮した災害危険箇所数を指標とした道路の災害リスク評価手法」
 - ・ 経路距離の導入方法を「ネットワークコストの統合」と「経路探索過程の工夫」の2視点で検討。
 - ・ k 番目経路探索手法を用いた経路探索による許容経路距離を満足する経路の抽出、各リンクの通過経路数と災害危険箇所数との比率による対策注目度の提案。

第4章 現実道路ネットワークへの災害危険箇所数を指標とした道路の災害リスク評価手法の適用

- ・ **【災害危険箇所数を指標とした道路の災害リスク評価手法】**
 - ・ 石川県の緊急輸送道路ネットワークと同県の地域防災計画を用いたケーススタディによる本提案手法の妥当性検証および特性把握。
- ・ **【経路距離を考慮した災害危険箇所数を指標とした道路の災害リスク評価手法】**
 - ・ 石川県の緊急輸送道路ネットワークと同県の地域防災計画を用いたケーススタディによる本提案手法の妥当性および特性把握。
 - ・ 基本手法との結果の差異に関する考察。

第5章 道路防災対策の検討・立案のための活用メニューの提案とその事例分析

- ・ 提案手法の活用方法として対策注目度の指標値順の対策箇所設定とその効果確認、対策注目度上位リンクの比較による検討材料の拡充、高災害リスク拠点ペアの抽出と個別対策の検討の3種類のメニューを提案する。
- ・ 活用メニューの提案にあたっては、各メニューでの活用の意図・目的を整理するとともに、実際の道路ネットワークを用いた事例分析を通して活用手順を示す。

第6章 結論と今後の課題

- ・ 本研究の結論
- ・ 提案した道路の災害リスク評価手法の適用条件
- ・ 今後の課題

図-1.7 本研究の構成フロー

第 1 章 参考文献

- 1) 内閣府，防災情報のページ 阪神・淡路大震災教訓情報資料集：
http://www.bousai.go.jp/kyoiku/kyokun/hanshin_awaji/data/detail/1-6-1.html (2019.12.18 閲覧)
- 2) 国土交通省東北地方整備局，震災伝承館 啓開：<http://infra-archive311.jp/s-kushinoha.html>
(2019.12.18 閲覧)
- 3) 中部地方幹線道路協議会 道路管理防災・震災対策検討分科会，中部版「くしの歯作戦」
(平成 29 年 5 月改訂版)：https://www.cbr.mlit.go.jp/road/kanri-bunkakai/pdf/170519_kushinoha.pdf (2019.12.18 閲覧)
- 4) 国土交通省道路局都市局，道路の防災機能の評価手法（案）：<https://www.mlit.go.jp/road/ir-irhyouka/pdf/hyouka.pdf> (2019.12.18 閲覧)
- 5) 国土交通省道路局都市局，道路ネットワークの防災機能の向上効果計測マニュアル（案）：
https://www.mlit.go.jp/road/ir-irhyouka/pdf/nw_manual.pdf (2019.12.18 閲覧)
- 6) 家田仁，柳沼秀樹，堤啓：新たな「道路の防災機能評価手法」の開発とその適用事例，土木施工，Vol.57，No.5，pp.17-20，2016.
- 7) 常田賢一，平成 28 年熊本地震の現地調査による被害の特徴と今後の対応に関する考察，一般財団法人 災害科学研究所 平成 28 年度災害等緊急調査報告書—平成 28 年 4 月熊本地震による被害調査—：http://csi.or.jp/uploads/2016kumamoto_jishin_1v1.pdf (2019.12.18 閲覧)
- 8) 家田仁，岩倉成志，平田輝満，柳沼秀樹：土木学会 熊本地震・広域交通ネットワーク調査団 中間報告（中間とりまとめ）～広域交通ネットワークの被災状況と今後の方向性～：
<http://committees.jsce.or.jp/report/system/files/%E7%86%8A%E6%9C%AC%E5%9C%B0%E9%9C%87%E3%83%BB%E5%BA%83%E5%9F%9F%E4%BA%A4%E9%80%9A%E3%83%8D%E3%83%83%E3%83%88%E3%83%AF%E3%83%BC%E3%82%AF%EF%BC%88%E4%B8%AD%E9%96%93%E3%81%A8%E3%82%8A%E3%81%BE%E3%81%A8%E3%82%81%EF%BC%89.pdf> (2019.12.18 閲覧)
- 9) 国土交通省，熊本地震を踏まえた課題と論点，<https://www.mlit.go.jp/common/001135911.pdf>
(2020.01.13 閲覧)
- 10) 道路の耐災害性強化に向けた有識者会議，道路の耐災害性強化に向けた提言—教訓から学び、教訓を超えて—：<https://www.mlit.go.jp/road/ir-ir-council/sdt/pdf/t02.pdf> (2020.01.13 閲覧)
- 11) 国土交通省，近年の主な災害で得られた教訓と課題：<https://www.mlit.go.jp/road/ir-ir-council/sdt/pdf/01/04.pdf> (2020.02.01 閲覧)
- 12) 気象庁，日本付近で発生した主な被害地震（平成 8 年以降）：
<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/higai/higai1996-new.html> (2020.02.01 閲覧)

- 13) 気象庁，災害をもたらした気象事例（平成元年～本年）：
https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/index_1989.html (2020.02.01 閲覧)
- 14) 消防庁，平成 30 年版消防白書 2. 平成 30 年 1 月から 10 月までの主な風水害：
<https://www.fdma.go.jp/publication/hakusho/h30/chapter1/section5/para1/38441.html>
 (2020.02.01 閲覧)
- 15) 土木学会東日本大震災フォローアップ委員会 災害対応マネジメント特定テーマ委員会：
 東日本大震災の災害対応マネジメント，
<http://www.jsce.or.jp/committee/cmc/pdf/%E6%9D%B1%E6%97%A5%E6%9C%AC%E5%A4%A7%E9%9C%87%E7%81%BDFU%E5%A7%94%E5%93%A1%E4%BC%9A/%E6%9D%B1%E6%97%A5%E6%9C%AC%E5%A4%A7%E9%9C%87%E7%81%BD%E7%81%BD%E5%AE%B3%E5%AF%BE%E5%BF%9C%E3%83%9E%E3%83%8D%E3%82%B8%E3%83%A1%E3%83%B3%E3%83%88.pdf> (2020.02.02 閲覧)
- 16) 東日本大震災合同調査報告書編集委員会：東日本大震災合同調査報告 土木編 4 交通施設の被害と復旧，丸善出版，2018.
- 17) 国土交通省，熊本地震による被災及び復旧状況：
<http://www.jice.or.jp/cms/kokudo/pdf/reports/autonomy/roads/01/siryos85.pdf> (2020.02.02 閲覧)
- 18) 国土技術政策総合研究所，熊本地震による道路構造物の被害と復旧への技術的支援：
http://www.nilim.go.jp/lab/bbg/kouenkai/kouenkai2016/pdf/161208_09.pdf (2020.02.02 閲覧)
- 19) 内閣府，大阪府北部を震源とする地震に係る被害状況等について：
http://www.bousai.go.jp/updates/h30jishin_osaka/index.html (2020.02.02 閲覧)
- 20) 内閣府，平成 30 年北海道胆振東部地震に係る被害状況等について：
http://www.bousai.go.jp/updates/h30jishin_hokkaido/index.html (2020.02.02 閲覧)
- 21) 国土交通省中国地方整備局，平成 30 年 7 月豪雨関連の記録誌 平成 30 年 7 月豪雨～中国地方整備局 災害対応の記録～：https://www.cgr.mlit.go.jp/photo/h3007gouu_kiroku/index.htm
 (2020.02.02 閲覧)
- 22) 国土交通省四国地方整備局，平成 30 年 7 月豪雨～四国地方の道路被害と対応～：
https://www.skr.mlit.go.jp/road/h30_7gatsugou/h30_7gatsugou.html (2020.02.02 閲覧)
- 23) 内閣府，平成 30 年台風第 21 号に係る被害状況等について：
<http://www.bousai.go.jp/updates/h30typhoon21/> (2020.02.02 閲覧)
- 24) NEXCO 東日本，東北地方太平洋沖地震による高速道路の被害と復旧について：
https://www.e-nexco.co.jp/pressroom/press_release/head_office/h23/0318b/ (2020.02.03 閲覧)
- 25) 国土技術総合政策研究所，道路橋の被災状況とその特徴：

<http://www.nilim.go.jp/lab/bbg/saigai/h23tohoku/houkoku/happyou/2-7.pdf>(2020.02.03 閲覧)

26) 国 土 交 通 省 , 熊 本 地 震 に よ る 被 災 及 び 復 旧 状 況 :

<https://www.mlit.go.jp/common/001135910.pdf>(2020.02.03 閲覧)

27) 大阪府, 災害写真館 平成 30 年 9 月 4 日から 5 日 台風第 21 号による被害:

<http://www.pref.osaka.lg.jp/tondo/kakosaigai/index.html> (2020.02.03 閲覧)

第2章 既往研究の整理および本研究の位置付け

2.1 「道路の防災機能の評価手法（案）」の概要

災害時を想定した道路ネットワーク評価に関する研究は数多い。その中で、「道路の防災機能の評価手法（案）」^{1),2),3)}は我が国の実務で活用される代表的手法である。このような代表的手法の概要を整理することは、複数の異なる対策方針を持つ手法を相互補完的に活用しながら深度化を目指すべきという立場をとる本研究の位置付けを行なう上で重要である。具体的には、本手法のフレームワークを参考に、実務への適用性について考察を示す。さらに、本手法の課題点の整理を通して、手法の深度化を試みる際に、道路防災対策の検討・立案のための基礎情報をより充実させるために考慮されることが望ましい要件の抽出を試みる。

2.1.1 「道路の防災機能の評価手法（案）」の導入経緯

従来の道路事業の評価では、費用便益分析（B/C）を中心とする評価が行われていた。しかし、道路の果たす役割はここで対象とされるもの以外にもある。例えば東日本大震災では救助・救援活動、広域的な緊急物資の輸送を可能としたほか、避難路や避難場所としても機能するなどした。こうした事例から、道路の防災機能は従来の費用便益分析では必ずしも十分に評価できないとの指摘がなされた^{4),5)}。これに加えて国土交通省社会資本整備審議会・道路分科会では、費用便益分析で十分に評価できない道路の機能、効果等について、適切に事業評価へ反映する手法はどうあるべきか、特に東日本大震災における防災面での道路の役割を踏まえて検討することが事業評価のあり方の検討課題として挙げられた⁵⁾。こうした背景から、災害時における道路ネットワーク中の脆弱箇所の抽出や、道路の防災機能に着目して道路プロジェクトの良し悪しを評価する手法として開発・導入されたのが「道路の防災機能の評価手法（暫定案）」^{6),7),8)}（以下、暫定手法）である。

暫定手法は道路プロジェクトによる改善効果の高低などを評価するもので、従来の費用便益分析による事業評価を補完するものとして位置付けられた。一方で、暫定手法は取り急ぎ開発・導入されたものであり、「当初からできる限り早く改良手法を作り上げること」とされた³⁾ことや、実際の運用を通じて明らかになった課題や災害関連制度の充実、地域の防災戦略の深化等を踏まえて手法の改善が必須とされた⁹⁾。こうした背景を踏まえて、新たに構築されたのが暫定手法の改善手法にあたる「道路の防災機能の評価手法（案）」である。

2.1.2 「道路の防災機能の評価手法（案）」のフレームワーク

(1) 基本的な考え方

道路ネットワーク上の災害リスクに基づいて、災害時における道路の通行可否を設定する。これによって拠点間の移動に要する期待所要時間を平常時・災害時とでそれぞれ算出することが可能となる。また、道路の改良を考えた時、これらはある道路整備が「実施された場合」と「されない場合」とでもそれぞれ算出できる。すなわち、ある拠点間の期待所要時間は表-2.1に整理するような4つのシナリオで算出される。これらより、平常時に対する災害時の速達性の低下度合いや、道路整備が「行われない場合（現状）」に対する「行われる場合（将来）」の速達性の改善度合いを計測することで防災機能を分析・評価するものである。

この際、現時点で得られている知見や研究成果からは、発災後の交通量や旅行速度等を推定することは困難であるため、そのような推計に依らずネットワークの連結性の観点から評価を行なう。また、災害の規模や被災箇所を精緻に推定することも困難であることを踏まえ、技術的な基準等の適合状況等を基に通行の可否を設定する。

表-2.1 「道路の防災機能の評価手法（案）」におけるシナリオ設定の区分表

区分表		平常時	災害時
道路整備	無	O + N	O + H
	有	W + N	W + H

(2) 防災機能評価の検討フロー

本手法による防災機能評価の検討フローを図-2.1に示し、以下に各フローの概要を述べる。検討フローは全12フローから構成されている。

フロー①「現状ネットワークの構築」では対象範囲の設定、拠点の設定、ネットワークの設定の順に評価時点の対象範囲内のネットワークを構築する。

フロー②「評価対象ペアの設定」では地域の防災計画等から評価対象の拠点ペアを設定する。

フロー③「各拠点ペア間の平常時における期待所要時間の計測」では現状ネットワークの通常時における各拠点ペア間の期待所要時間を算定する。

フロー④「各拠点ペア間の災害時における期待所要時間の計測」では災害シナリオから通行不能になると推定される箇所を反映した現状ネットワークにおける拠点ペア間の期待所要時間を算定する。

フロー⑤「各拠点ペア間の脆弱度の計測」では、現状ネットワークにおける平常時・災害時の期待所要時間から現状のネットワークの災害に対する脆弱度を算定する。

フロー⑥「将来ネットワークの構築」では、フロー①で構築した現状ネットワークに加えて評価対象とする事業箇所を反映することで将来ネットワークを構築する。

フロー⑦「各拠点ペア間の平常時における期待所要時間の計測」では将来ネットワークの通常時における各拠点ペア間の期待所要時間を算定する。

フロー⑧「各拠点ペア間の災害時における期待所要時間の計測」では災害シナリオから通行不能になると推定される箇所を反映した将来ネットワークにおける拠点ペア間の期待所要時間を算定する。

フロー⑨「各拠点ペア間の脆弱度の計測」では、将来ネットワークにおける平常時・災害時の期待所要時間から将来のネットワークの災害に対する脆弱度を算定する。

フロー⑩「各拠点ペアの防災機能ランクの評価」では、現状・将来の各ネットワークに対して算定した脆弱度から現状および将来の防災機能ランクを評価する。

フロー⑪「累積脆弱度の計測」では、現状・将来の各ネットワークにおいて算定した各拠点ペア間の脆弱度を最短経路上のリンクに累積することで累積脆弱度を算定する。

フロー⑫「各拠点ペアの改善度の計測（通常時，災害時）」では現状・将来の各ネットワークで算定した脆弱度から、平常時・災害時における改善度をそれぞれ算定する。

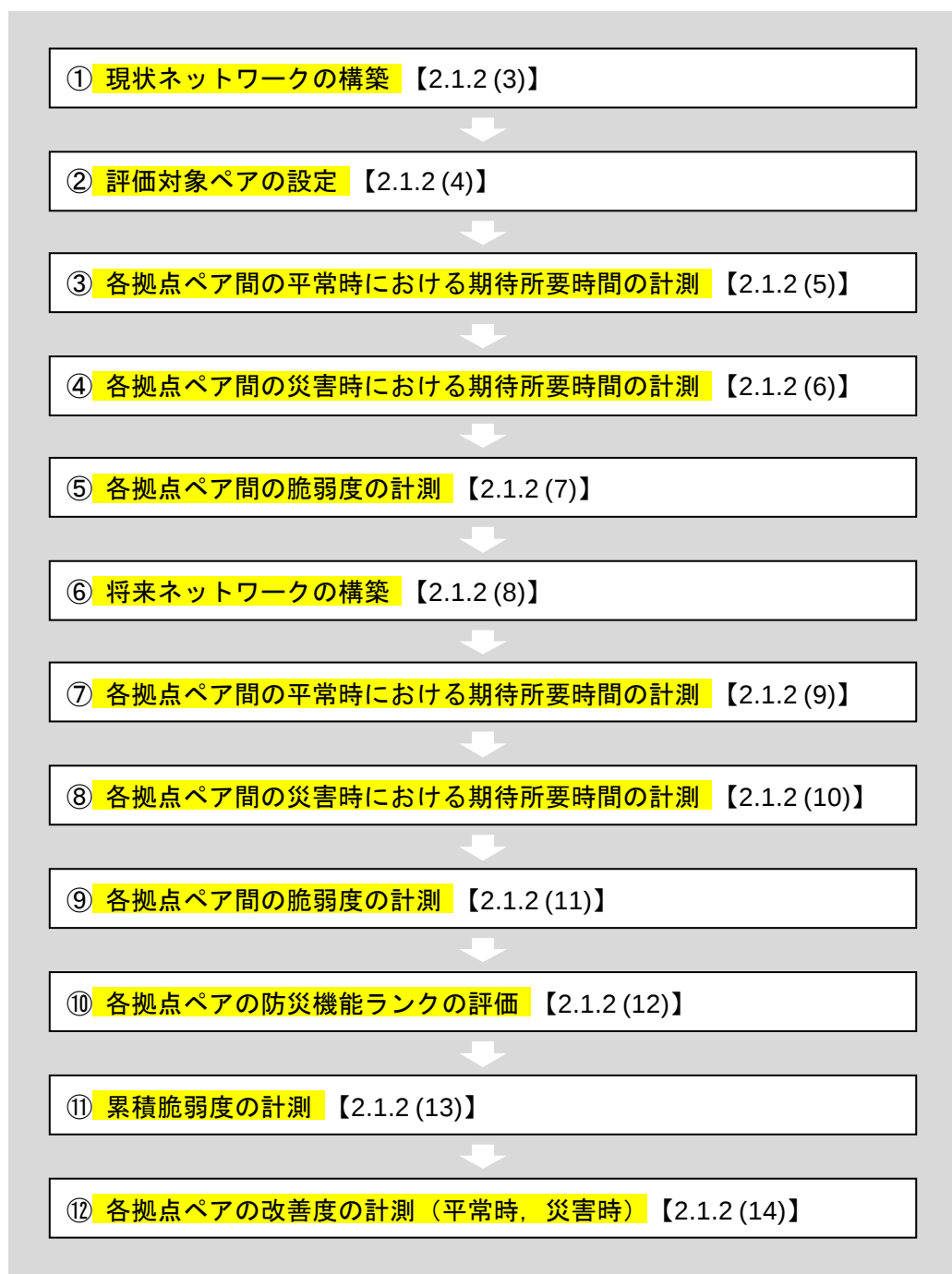


図-2.1 「道路の防災機能の評価手法（案）」における防災機能評価の検討フロー²⁾

(3) フロー①：現状ネットワークの構築

対象範囲の設定、拠点の設定、ネットワークの設定の3手順で現状ネットワークを構築する。
 対象範囲は評価対象事業の存する地方整備局等の道路管理者の担当管内を対象範囲とする。
 拠点は地域の防災計画等に基づいて、災害発生時に甚大な被害を受ける地域や孤立するおそれのある地域の拠点（被災拠点）、救助・救援活動や広域的な物資の輸送の拠点（支援拠点）等をノードとして設定する（表-2.2）。

評価に用いるネットワークは、主要地方道以上の道路を基本に設定する。この際、ネットワークを構成する各リンクの速度は平常時、災害時ともに規制速度を基本として設定する。

(4) フロー②：評価対象ペアの設定

地域の防災計画等に基づいて、災害時において移動経路が確保されている必要のある拠点ペアを評価対象として抽出する。

表-2.2 拠点区分²⁾

支援拠点		被災拠点	
広域	○都道府県庁、政令市役所所在地 ○陸上自衛隊駐屯地	地震	○震度7以上の市町村
交通	○地域境界の最寄りIC ○空港 ○港湾（重要港湾以上） ○貨物ターミナル駅	津波	○浸水する市町村
地域	○圏域中心都市 ・新地方生活圏計画等の中心都市 ・人口5万以上の都市 等 ○広域輸送物資拠点 ・南海トラフ地震における具体的な応急対策活動に関する計画 ・首都直下地震道路啓開計画 ・各地域防災計画 ・各地域の啓開計画 等 ○災害拠点病院 ・各地域防災計画 等 ○道の駅、SA/PA ○建設・交通当局の事務所 ・地方整備局 （本局、事務所、出張所） ・各県の土木事務所 等	豪雨豪雪	○落石・土砂災害・雪崩等により孤立するおそれのある市町村 ※事前通行規制区間、土砂災害警戒区域、防災点検結果等を参考に設定
		火山	○火山災害警戒地域に指定される市町村

(5) フロー③：各拠点ペア間の平常時における期待所要時間の計測

現状ネットワークでの平常時における各拠点ペア間の期待所要時間を式(2.1)より算定する.

$$S_{rs}^{O+N} = -\frac{1}{\theta^N} \ln \sum_{k \in C_{rs}^{O+N}} \exp\{-\theta^N \cdot t_{rs,k}^{O+N}\} \quad (2.1)$$

ここで,

- S_{rs}^{O+N} : 現状ネットワークの平常時における rs 間の期待所要時間
- θ^N : 平常時の分散パラメータ
- C_{rs}^{O+N} : 現状ネットワークの平常時における拠点 rs 間の経路集合
- $t_{rs,k}^{O+N}$: 現状ネットワークの平常時における拠点 rs 間に存在する経路 k の所要時間

(6) フロー④：各拠点ペア間の災害時における期待所要時間の計測

災害時における期待所要時間を計測するために、まず災害シナリオを設定する. シナリオは地震・津波、豪雨・豪雪、火山災害発生時を基本とする.

各災害リスクに対して、災害時のネットワークは現状ネットワークのうち以下の箇所を通行不能になる（と推定される）箇所として設定する.

- i) **共通**：物資を輸送する大型車の円滑な通行が困難な箇所（「福音 5.5m 以上の改良済みの箇所」以外の箇所等）
- ii) **地震**：昭和 55 年に改定された橋梁設計基準を満たさない橋梁及び落石・土砂災害・雪崩等のおそれのある箇所（「道路法第 46 条」に定める事前通行規制区間、防災点検結果等を参考に設定）
- iii) **津波**：科学的根拠により設定された津波浸水想定区域内で浸水する区間（30cm 以上を目安に設定）
- iv) **豪雨・豪雪**：落石、土砂災害、雪崩等のおそれのある箇所（「道路法第 46 条」に定める事前通行規制区間、「土砂災害防止第 7 条および第 9 条」に定められる土砂災害警戒区域、土砂災害特別警戒区域、防災点検結果、冬期通行不能区間等を参考に設定）
- v) **火山**：「活火山対策特別措置法第 3 条」に定められる火山災害警戒地域のうち、火山災害により著しい影響が及ぶおそれのある区間（火山ハザードマップ、避難計画等を参考に設定）

上記災害シナリオに基づいて、災害時に通行不能になると推定される箇所を現状ネットワークに反映した上で、現状ネットワークでの災害時における各拠点ペア間の期待所要時間を式(2.2)によって算定する。

$$S_{rs}^{O+H} = -\frac{1}{\theta^H} \ln \sum_{k \in C_{rs}^{O+H}} \exp\{-\theta^H \cdot t_{rs,k}^{O+H}\} \quad (2.2)$$

ここで、

- S_{rs}^{O+H} : 現状ネットワークの災害時における rs 間の期待所要時間
- θ^H : 災害時の分散パラメータ
- C_{rs}^{O+H} : 現状ネットワークの災害時における拠点 rs 間の経路集合
- $t_{rs,k}^{O+H}$: 現状ネットワークの災害時における拠点 rs 間に存在する経路 k の所要時間

(7) フロー⑤：各拠点ペア間の脆弱度の計測

式(2.1)および式(2.2)より算定した現状ネットワークでの平常時・災害時の各期待所要時間 S_{rs}^{O+N} , S_{rs}^{O+H} より、現状道路ネットワークの災害による脆弱度を式(2.3)によって算定する。

$$Z_{rs}^O = 1 - \frac{S_{rs}^{O+N}}{S_{rs}^{O+H}} \quad (2.3)$$

ここで、

- Z_{rs}^O : 道路整備を行わない場合の拠点 rs 間における脆弱度

式(2.3)より、本手法における道路整備を行わない場合の脆弱度とは、現状ネットワークでの平常時の期待所要時間に対する災害時の期待所要時間の増加率として定義されている。

(8) フロー⑥：将来ネットワークの構築

将来ネットワークは、フロー①で構築した現状ネットワークに加えて、評価対象とする事業箇所を考慮することで構築する。例えば、路線の新規整備が評価対象の事業である場合、その路線に相当するリンクを現状ネットワークに追加したものが将来ネットワークになる。

(9) フロー⑦：各拠点ペア間の平常時における期待所要時間の計測

将来ネットワークでの平常時における各拠点ペア間の期待所要時間は式(2.4)から算定される。

$$S_{rs}^{W+N} = -\frac{1}{\theta^N} \ln \sum_{k \in C_{rs}^{W+N}} \exp\{-\theta^N \cdot t_{rs,k}^{W+N}\} \quad (2.4)$$

ここで,

- S_{rs}^{W+N} : 将来ネットワークの平常時における rs 間の期待所要時間
- θ^N : 平常時の分散パラメータ
- C_{rs}^{W+N} : 将来ネットワークの平常時における拠点 rs 間の経路集合
- $t_{rs,k}^{W+N}$: 将来ネットワークの平常時における拠点 rs 間に存在する経路 k の所要時間

(10) フロー⑧：各拠点ペア間の災害時における期待所要時間の計測

フロー④に示した災害シナリオに基づいて、災害時に通行不能になると推定される箇所を将来ネットワークに反映した上で、将来ネットワークでの災害時における各拠点ペア間の期待所要時間を式(2.5)によって算定する。

$$S_{rs}^{W+H} = -\frac{1}{\theta^H} \ln \sum_{k \in C_{rs}^{W+H}} \exp\{-\theta^H \cdot t_{rs,k}^{W+H}\} \quad (2.5)$$

ここで,

- S_{rs}^{W+H} : 将来ネットワークの災害時における rs 間の期待所要時間
- θ^H : 災害時の分散パラメータ
- C_{rs}^{W+H} : 将来ネットワークの災害時における拠点 rs 間の経路集合
- $t_{rs,k}^{W+H}$: 将来ネットワークの災害時における拠点 rs 間に存在する経路 k の所要時間

(11) フロー⑨：各拠点ペア間の脆弱度の計測

式(2.4)および式(2.5)より算定した将来ネットワークでの平常時・災害時の各期待所要時間 S_{rs}^{W+N} , S_{rs}^{W+H} より、将来道路ネットワークの災害による脆弱度を式(2.6)によって算定する。

$$Z_{rs}^W = 1 - \frac{S_{rs}^{W+N}}{S_{rs}^{W+H}} \quad (2.6)$$

ここで,

z_{rs}^W : 道路整備を行う場合の拠点 rs 間における脆弱度

式(2.6)より, 本手法における道路整備を行う場合の脆弱度とは, 将来ネットワークでの平常時の期待所要時間に対する災害時の期待所要時間の増加率として定義されている.

(12) フロー⑩: 各拠点ペアの防災機能ランクの評価

式(2.3)および式(2.6)より算定された現状・将来各道路ネットワークの脆弱度に対して, 表-2.3に示すような基準に基づいて現状及び将来の拠点 rs 間における防災機能ランクを評価する.

表-2.3 防災機能ランクの評価基準²⁾

評価ランク	脆弱度	備考
A	0	災害時も通常時と同じ期待所要時間
B	0 より大～1/3 未満	災害時は通常時の 1.5 倍未満の期待所要時間
C	1/3 以上～1 未満	災害時は通常時の 1.5 倍以上の期待所要時間
D	1	災害時には到達不可能

(13) フロー⑪: 累積脆弱度の計測

式(2.3)および式(2.6)により算出された各拠点ペア間の脆弱度を, 最短経路上の災害危険箇所が存在するリンク (フロー④に示した災害シナリオに基づいて通行不能になると推定されたリンク) ごとに累積し, さらに当該リンク延長を乗ずることで, 道路整備を行わない場合と行う場合の累積脆弱度をそれぞれ算定する.

(14) フロー⑫：各拠点ペアの改善度の計測（平常時，災害時）

式(2.1)，式(2.2)，式(2.4)，式(2.5)により算定した各期待所要時間 S_{rs}^{O+N} ， S_{rs}^{O+H} ， S_{rs}^{W+N} ， S_{rs}^{W+H} より，平常時における改善度および災害時における改善度を式(2.7)，式(2.8)より算定する．

$$k_{rs}^N = 1 - \frac{S_{rs}^{W+N}}{S_{rs}^{O+N}} \quad (2.7)$$

$$k_{rs}^H = 1 - \frac{S_{rs}^{W+H}}{S_{rs}^{O+H}} \quad (2.8)$$

ここで， k_{rs}^N ：平常時の改善度， k_{rs}^H ：災害時の改善度

式(2.7)および式(2.8)より，本手法における改善度とは，道路整備による平常時・災害時における期待所要時間の減少率として定義されている．

2.1.3 「道路の防災機能の評価手法（案）」から観る実務への適用性

現実規模の道路ネットワークを対象とする実務において，評価手法の適用を妨げる要因として一般に考えられるのは，計算規模の拡大に伴う計算の困難性や，手法適用のための各種分析条件の設定に係る困難性の 2 要因である．前者については，依然として課題とされる手法も一部あるが，多くの手法ではコンピュータの性能向上に伴ってその困難は解決されている．実際に，本手法には計算上の困難は一切指摘されない．一方で，手法適用のための各種分析条件の設定についてはその限りではない．例えば，推定が困難な分析条件は手法そのものの適用を困難とする場合がある．本手法では 2.1.2 項に述べた発災後の交通量や旅行速度，災害の規模や被災箇所がこれに該当する．この問題に対応するため，推定精度を落とした分析条件が課される場合がある．本手法の場合，交通流の推計に依らずにネットワークの連結性の観点から平時の旅行時間（旅行速度）を用いた評価を行っている．また，技術的な基準等の適合状況等を基に通行の可否を設定するとしている．

以上を踏まえると，交通量や旅行速度等の発災後の道路状況の推定を伴う条件や，災害の規模や被災箇所，被害規模等の精緻な推定を伴う条件は，現時点では実務への適用上の困難となる分析条件の 1 つであると考えられる．したがって，これらを回避することで実務への適用性を確保しようという試みそのものは，1 つの方向性として認めうるものであろう．一方で，この方向性は推定精度を落とすことで実務への適用性を確保するものであり，それによって，当該手法にどのような限界が生ずるのかが示される必要がある．

2.1.4 「道路の防災機能の評価手法（案）」のフレームワークに関する課題

本手法は実務で活用される手法であるが、課題も指摘される。この課題を道路ネットワーク評価手法に共通して指摘されるものに読み替えることができれば、道路防災対策の検討・立案のための基礎情報をより充実させることにつながる要件を抽出することができると考えられる。このために、以下に本手法の2点の課題を整理する。

1点目は、災害シナリオ上は到達不可能になると推定される拠点ペア（表-2.3で防災機能評価ランクDとされる拠点ペア）ではその脆弱度が一律同値（脆弱度1）で評価される点である。状況としては「到達不可能」という点で共通しているが、脆弱度という点では拠点ペアごとに差異があると考えられる。例えば、拠点ペアを到達不可能とする原因が1箇所しかないペアと複数あるペアとでは後者の方が状態は悪いが、本手法ではこれは区別されない。

2点目は拠点ペアの脆弱度の算定フローと、累積脆弱度の算定フローとで着目している経路が一致していない点である。拠点ペアの脆弱度は代替経路の存在を考慮した上で算定される。一方、その脆弱度を用いて算定される累積脆弱度では最短経路しか考慮されない。経路をベースとした評価構造である以上、対象とする経路は評価全体で統一されることが望ましい。

以上の課題を道路ネットワーク評価手法に関する共通の課題として再整理するとともに、その課題が考慮されることで充実すると期待される基礎情報の視点での効果を整理する。まず、1点目の課題は「拠点ペアの評価が一律同値とならないような評価構造とすること」と整理できる。これを考慮することで、拠点ペアごとの機能性（本手法の定義では脆弱度）の違いがより明確に評価されるようになる。これによって、重要リンクや重要拠点ペアなど、各手法で評価対象とされている要素の評価結果がより決めの細かいものとなることが期待される。次に、2点目の課題は「対象とされる経路集合が評価全体に渡って統一されていること」と整理できる。これを考慮することで、道路ネットワークの機能性評価で着目した経路と対策上着目する経路とが整合する。これによって、対策によって機能が向上する経路とその向上度合いを理解することが容易になることが期待される。

2.2 災害時を想定した道路ネットワーク評価に関する研究

災害時を想定した道路ネットワーク評価に関する既往研究として、①連結信頼性に関するもの、②道路ネットワークの脆弱性評価に関するもの、③道路ネットワークの幾何的構造に基づく評価に関するもの、④最適化手法等に基づく最適対策戦略に関するものなどのアプローチでの研究がある。以下にアプローチごとに本研究に関連する主な既往研究の概要を整理する。

2.2.1 連結信頼性に関する研究のレビュー

ネットワークの信頼性評価という点では、システム工学などで古くから研究が進められてきた。土木工学分野では、これと同様の考え方をを用いて災害発生時の信頼性をどのように評価し、確保するのが注目されてきた。このような評価のためにまず指標として提案されたのが連結信頼性¹⁰⁾である。連結信頼性は2つの地点間が連結される確率で評価するノード間信頼度¹¹⁾と、リンク自体が走行できる確率で評価するリンク信頼度¹¹⁾の2つで指標化されている。

若林・亀田¹²⁾は交通需要が交通容量を超えないサービス水準でノード間が連結される確率をノード間連結信頼性と定義して、ロマ・プリエタ地震を対象とした連結信頼性評価を行った。若林¹³⁾は任意ノード間において、あるサービスレベル以上での移動が保証される確率的指標として確率重要度指標を提案した。また、阪神淡路大震災をモデルケースとした分析によって、ネットワークの質的サービス水準が評価できることを示した。若林ら¹⁴⁾は確率重要度指標では信頼度のきわめて高いリンクの信頼度改善は信頼度の低いリンクの改善よりも困難であることを考慮できないという問題点を踏まえて、リンク信頼度のパーセント変化に対するノード間信頼度のパーセント変化として重要度を定義するクリティカリティ重要度を提案した。朝倉ら¹⁵⁾¹⁶⁾は災害時であっても許容される時間や迂回距離の範囲でトリップが完結できなければ交通目的を達成できない場合も少なくないという立場から、許容時間の範囲内でOD間がトリップ可能な確率として信頼性を定義した。以上のように、一部が機能を失ってもネットワーク全体では機能が維持できるような道路ネットワークの構築方法や管理運用策を議論することを目的に、ネットワークの交通機能（サービス水準）に着目した研究が初期において行われている。

道路ネットワークの連結性能に着目した研究も同時期から行われている。高山・大野¹⁷⁾は非常時における道路ネットワークの連結性能評価のための近似計算法を提案し、高山¹⁸⁾で気象観測データを用いて通行規制確率を求め、奥能登地域へ適用した。廣瀬ら¹⁹⁾はリンク長、車道幅、地盤特性値の3指標を用いたリンク信頼度の推計手法とそのリンク信頼度に基づく災害時道路網の作成手法を提案した。また、徳島県を対象とした分析を通して道路防災投資効果について検討している。能島²⁰⁾、能島・山中²¹⁾はリンク信頼度を非破壊確率として定義し、最大フローを評価指標とした信頼性解析手法を提案した。ここでの最大フローは任意の2ノード間を対象とするものである。さらに、目標水準の充足・非充足とリンクの破壊・非破壊の関係から算出されるリンク重要度から施設強化の優先順位に関して考察した。廣瀬ら¹⁹⁾、能島²⁰⁾、能島・山中²¹⁾も交通量や旅行時間、交通容量などネットワークのサービス水準に着目した研究と同様の要素にも着目している。その違いは、リンク信頼度をサービス水準から定義せず、リンクの切断確率（非切断確率）として定義している点にある。近年では、高山・大野¹⁷⁾や高山¹⁸⁾のよう

に連結性能に重点を置いた研究や、廣瀬ら¹⁹⁾、能島²⁰⁾、能島・山中²¹⁾のように切断確率として定義したリンク信頼度に基づく整備手法等に関する研究が見られる。前者には小野・本郷²²⁾、小野・日々²³⁾、伊藤・庄司²⁴⁾など、後者には原田ら²⁵⁾、安藤・喜多²⁶⁾、松田ら²⁷⁾などがある。

小野・本郷²²⁾は中山間地の集落の地震時の孤立可能性評価を目的として、斜面の崩壊確率を用いた非連結確率の評価手法を提案した。評価自体はシンプルな 2 点間連結信頼性であるが、ノードとリンクの破壊確率（信頼度）の定義方法を、PGA（表面最大確率）と斜面勾配を用いる評価式²³⁾を援用することで具体的に提案している。小野・日比²⁴⁾ではこの手法を 2004 年新潟県中越地震と 2016 年熊本地震でのケースに適用し、集落の孤立可能性を定量化できることを示した。伊藤・庄司²⁵⁾は津波による平面道路と橋梁の物理的な被害関数をもとに任意地点間における最短経路の連結信頼性を評価する方法を提案した。小野・本郷²²⁾と同様に、連結信頼性の評価自体はシンプルな 2 点間連結信頼性であるが、被害関数を用いた具体的なリンク信頼度の定義方法を提案した。これら研究では、現段階で考慮できていない被害要因を組み込んでより精緻にリンクの破壊確率を算出することが今後の課題として挙げられている。

原田ら²⁶⁾は実務への適用を想定し、OD 間のサービス連結信頼度（確保されるべき整備水準）を確保するために、必要最小限のパスで構成される限定ネットワークを選定することで連結信頼性を評価する方法を提案した。安藤・喜多²⁷⁾は整備効果をすべての集落と連結している確率の向上と災害時の迂回による損失時間の最小化と定義し、全点間連結信頼性、通行止め発生時の総走行時間・台数、補修・補強費用の 3 要素を指標とした道路施設の整備計画の策定手法を提案した。松田ら²⁸⁾は能登半島地震における被害実態から導いた道路構造物の震度別被災率からリンク信頼度を定義し、全点間連結信頼度と、路線種別と交通量から定義したリンクの重要度とを考慮した道路構造物の耐震化整備優先度の設定手法を提案した。以上のように、リンクの切断確率として定義したリンク信頼度に基づく信頼性解析手法や、整備計画・整備手法に関する研究が進められている。各手法の方法論自体の改良・拡張を除けば、リンク信頼度をいかに設定するかがこれら研究の共通の課題として挙げられている。

一方で、連結信頼性評価には計算上の困難が伴う場合もある。例えば、原田ら²⁶⁾や安藤・喜多²⁷⁾はこの問題に言及している。連結信頼性評価に係る効率的な解法に関する研究も初期から行われている。若林・飯田²⁹⁾はミニマル・パス法およびミニマル・カット法を用いて信頼度を計算する方法を提案した。直感的な理解しやすさを有するものの、最小パスやカット集合をどのように求めるかという課題もある。このような課題に対して、近似的な計算法も提案されている^{30),31),32)}。一方で、大規模な道路ネットワークにおける信頼性解析のために、近似計算ではなくネットワーク自体を簡略化・集約化しようというアプローチの研究もある^{33),34),35),36),37)}。

2.2.2 道路ネットワークの脆弱性評価に関する研究のレビュー

連結信頼性と類似した考え方として、道路ネットワークの脆弱性が提案されている。自然災害等の大規模な被害をもたらす事象が生起する確率は非常に小さいが、一方で、その生起確率の大小に依らず、これら事象が生起した場合の被害や影響は甚大である。中山³⁸⁾はこのような事象に対しては、生起確率を正確に計測することは極めて困難であり、期待的な被害・損害を捉えることは困難であることから、確率論の俎上に載せず、道路ネットワークが機能を果たす上での「弱さ」のみを対象とする場合にそれを脆弱性と呼んでいると述べた。

脆弱性については、これまで以下のような定義づけがなされている。Taylor et al.³⁹⁾は、信頼性は接続性と確率に着目した概念であるが、脆弱性はリンク途絶の確率とは関係なく、ネットワークの構造上の弱点とリンク途絶で生じる影響に密接した概念であるとしている。また、脆弱なノードとは少数のリンクで途絶あるいは重大な劣化が生じた場合にアクセシビリティが大幅に低下するノード、クリティカルなリンクとは、途絶あるいは重大な劣化が生じた場合にネットワーク全体や特定のノードのアクセシビリティを大幅に低下させるリンクであると定義した。Berdica⁴⁰⁾はより一般的な定義として、道路ネットワークにおける脆弱性とは道路ネットワークのサービス性を大幅に低下させる事象に対する感受性であるとした。また、Jenelius et al.⁴¹⁾は *exposure* と *importance* という2つの概念を提案した。どちらもネットワークの構成要素の損傷による影響度合いを測る指標であるが、*importance* が単一リンクの損傷による影響度合いを扱うのに対して、*exposure* はある事象による影響度合いとして定義されている。すなわちある事象でネットワークが被る損傷全体を対象としており、複数リンクが損傷することをも含んでいる。以上のように、道路ネットワークの脆弱性の定義自体は確立されているとは言えないものの、その被害・影響が甚大である事象の影響度合いを測定しようという点は共通の目的である。

影響度合いの評価ではアクセシビリティに着目したものが多く見られる。Taylor et al.³⁹⁾は Hansen のアクセシビリティ指標⁴²⁾と、人口の遠隔性の指標である ARIA 指標⁴³⁾をオーストラリアの道路ネットワークへ適用した。Jenelius et al.⁴¹⁾は *exposure* と *importance* を一般化費用の増加の総計として定義し、北スウェーデンの道路ネットワークへ適用した。Lleras-Echeverri, Sánchez-Silva⁴⁴⁾も一般化費用に着目しているが、彼らはそれをアクセシビリティ指標へ展開し、コロンビアの高速道路ネットワークへ適用した。Sohn⁴⁵⁾は距離と交通量を人口で重み付けしたアクセシビリティ指標を提案し、メリーランド州の高速道路ネットワークへ適用した。一方で、Chang, Nojima⁴⁶⁾および Chang⁴⁷⁾は単一の評価指標ではなく、ネットワークの総延長、被災前後の距離のみを扱ったアクセシビリティ指標、被災前後の距離と発災前の交通量によるアクセシビリティ指標の3指標を用いて、災害時の交通計画・復興計画について考察している。以上の

研究では特に最短経路に着目している。原田ら⁴⁸⁾はリダンダンシー性に着目して、評価の中で複数経路の存在を扱った。具体的には、2地点間の接続性を非重複複経の数え上げで評価する接続脆弱性の考え方⁴⁹⁾と、影響度合いを考慮するために Hansen のアクセシビリティ指標⁴²⁾を組み合わせた接続脆弱性評価手法を提案し、岐阜県道路ネットワークへ適用した。

Jenelius et al.⁴¹⁾が複数リンクの損傷も考慮した exposure を提案しているものの、以上の研究では単一リンクの損傷が想定される場合が多かった。そこで、複数リンクの損傷を考慮した研究もある。大澤ら⁵⁰⁾はリンク被災パターンの生成手法と、各パターン下でリンクが生じさせた迂回時間の計測手法を提案した。堀井⁵¹⁾は計量地理学分野の迂回度指標に着目し、迂回距離の長短によるリンク損傷の影響度合いの計測手法を提案した。南ら⁵²⁾は代替ルートの整備水準に着目して、その経路数や旅行時間を評価基準とする経路代替性指数を提案した。Kurauchi et al.⁵³⁾は交通容量に着目して、途絶時にネットワーク容量を大きく低下させるリンクを重要とする容量脆弱性を提案した。「道路の防災機能の評価手法(案)」^{1),2),3)}も、ネットワークの機能性と複数リンクの損傷に着目している点で、これら研究と同様のアプローチと言えよう。

ここまで取り上げた既往研究では、脆弱なリンクやノード(都市)を抽出することが目的であったが、地域を単位とした脆弱性評価に関する研究も見られる。鎌谷ら⁵⁴⁾は道路ネットワークのレジリエンス評価を目的として、過去の自然災害時における実績から得られるリンクの破壊確率と速度低下率を用いて、メッシュ分割した地域単位での移動所要時間の評価を試みている。Jenelius & Mattsson⁵⁵⁾は、ネットワークの損傷は空間的な広がりをもって生じることが多いことから、既存の研究で着目されてきた単一のリンク損傷のみを考慮した場合と影響がどの程度異なるかを調査することが重要であると指摘した。このためにグリッドベースでの脆弱性分析手法を提案した。この方法では、ネットワークの損傷は均一な形状とサイズを持つグリッド単位で表現され、影響度合いの評価指標としては旅行時間や交通需要の変動に着目している。

以上のように、脆弱性の定義そのものは確立していないものの、ネットワークの損傷による影響度合いについては道路ネットワークの交通機能(アクセシビリティ、旅行時間、交通量、交通容量等)の変動で評価している点で共通している。評価で考慮される具体要素は手法ごとに異なるが、これは脆弱性評価の目的や脆弱性に対する着眼点の違いによるものと考えられる。

2.2.3 道路ネットワークの幾何的構造に基づく評価に関する研究のレビュー

連結信頼性や脆弱性の他に、道路ネットワークの幾何的構造に着目した研究も近年行われている。倉内⁵⁶⁾は既往手法には大規模ネットワークでの計算困難性や、ネットワークの詳細度や範囲次第で結果が変化する可能性がある等の問題点を指摘し、新たな方法論の構築が必要であ

ると述べた．このための第一歩として，Network Science 分野の指標と交通工学的な指標との関係性について考察し，平均非重複経路本数が Network Entropy 値⁵⁷⁾と，ネットワーク容量がラプラシアン行列の第2最小固有値⁵⁸⁾と関係性が高いことを示した．一方で，ここでは重要なリンクの抽出方法は示しておらず，そのようなリンクの抽出可能性の検証が必要であるとした．その方向性の1つとして，Bell et al.⁵⁹⁾のようにラプラシアン行列の第2最小固有値に対応する固有ベクトルの符号でネットワークを分割し，その境界リンクを重要リンクとして考えることを示した．このような重要リンクの抽出を試みた研究として，Nouzard et al.⁶⁰⁾，中南ら⁶¹⁾，坪川ら⁶²⁾，Akbarazadeh et al.⁶³⁾などがある．Nouzard et al.⁶⁰⁾は交通容量と交通量の線型結合を重みとした隣接行列の最大固有値に基づくリンク重要度を提案した．加えて，リンクのクラスタリングによる重要領域の特定方法も提案した．中南ら⁶¹⁾はリンクが長いほど途絶する可能性も高いとして，リンク長の逆数を隣接行列の成分とし，ノード間の第2最小固有ベクトルの成分差でリンクの脆弱度を評価する方法を提案した．坪川ら⁶²⁾も中南ら⁶¹⁾と同様の隣接行列を扱っている．中南ら⁶¹⁾との違いは，バネ質点系の振動問題として捉えることで変位に関する境界条件を課すことの必要性を指摘している点にある．具体的には，重要な拠点ノードに境界条件を課し，特定ノードに強制的な変位を与えた場合のリンクの伸び量を評価指標として提案している．Akbarazadeh et al.⁶³⁾は交通量，交通容量，距離の逆数，単位量を重みとしたネットワーククラスタリングを行い，それらクラスターの境界に位置するリンクを脆弱なリンクと位置付けた．

以上のように，Network Science の知見を援用した道路ネットワークの脆弱リンクや重要リンクの評価に関する研究が精力的に進められている．これら研究の今後の課題には，手法の改良・拡張を除けば，脆弱性や重要度の評価に関わる各種パラメータの与え方や組み込むべき要素の検討，より現実的なシミュレーション条件の検討などが挙げられている．

上記研究以外にもネットワーク構造に着目した研究は行われている．ネットワークの特徴を示す指標として古くから研究されている中心性指標に着目した研究や，グラフ理論の知見を援用した研究がこれに該当する．このような研究として，土屋ら⁶⁴⁾，竹之内ら⁶⁵⁾，小林ら⁶⁶⁾，羽深・丸山⁶⁷⁾，Demšar et al.⁶⁸⁾などがある．土屋ら⁶⁴⁾は情報中心性⁶⁹⁾の概念を援用して，経路の重複を許容するが，もし経路重複がある場合には，その分だけ冗長性が下がるようなネットワークの冗長性指標を提案した．竹之内ら⁶⁵⁾は防災船着場の整備効果を評価することを目的として，局所辺連結度に着目した負傷者搬送への防災船着場の整備効果の評価指標と，シンベル指数⁷⁰⁾と媒介中心性⁷¹⁾の2指標を用いた防災船着場の重要度評価指標を提案した．小林ら⁶⁶⁾は固有ベクトル中心性⁷²⁾による拠点的ノードの抽出とそれに基づくネットワークのサブエリア分割手法を提案した．羽深・丸山⁶⁷⁾は都市空間解析などで広く用いられているスペースシンタックス理論⁷³⁾に着目し，移動効率に基づいた広域防災拠点の配置手法を提案した．Demšar et al.⁶⁸⁾は線グ

ラフを用いて、ネットワークの脆弱性と重要箇所について議論している．具体的にはノード削除、媒介中心性⁷¹⁾、クラスター係数⁷⁴⁾の3指標を用いてヘルシンキ都市圏の道路ネットワークをモデルケースとした分析を行い、ノード削除と媒介中心性が道路ネットワークの脆弱性評価に有効な指標であると結論付けた．田島・本間⁷⁵⁾は複数の経路同士の空間的關係に着目したネットワークの頑健性評価指標を提案した．ネットワークの幾何構造だけでなく、リンクを切断する障害の影響範囲とネットワークの構成要素の空間的配置を考慮することで、単一の障害が複数リンクに同時に影響を及ぼすという、実際に観察される現象をモデル上で表現した．

以上のように、道路ネットワークの脆弱リンク・ノード（重要リンク・ノード）を評価するために様々な指標を適用することが提案されている．今後の課題として、防災計画上の有用な知見を引き出すためにはリンクやノードへの属性の付与方法の検討、実空間でのパラメータの設定方法、災害状況を考慮した分析条件の検討や手法の改良・拡張などが挙げられている．

2.2.4 最適化手法等に基づく最適対策戦略に関する研究のレビュー

連結信頼性・脆弱性評価・幾何構造に基づく評価に関する研究はいずれも何らかの評価指標によって、防災対策上の重要箇所やネットワーク上の脆弱箇所を抽出することを目的としていた．これらと異なる視点として、災害対応に係る施設の最適配置やネットワークの最適な補強計画、新規整備計画等の最適な対策戦略を議論した研究も行われている．

近藤ら⁷⁶⁾、瀬戸ら⁷⁷⁾、瀬戸ら⁷⁸⁾は医療施設の最適配置あるいは医師の最適配置を議論している．これら研究では災害時における住民の医療サービスへのアクセス性を確保することを目的に、評価関数としてアクセシビリティ指標に着目している．さらに、近藤ら⁷⁹⁾では道路の途絶リスクとして連結信頼性も考慮している．これに対して、途絶確率の推定の困難さや計算負荷を理由として瀬戸ら⁷⁷⁾、瀬戸ら⁷⁸⁾では連結信頼性の代わりに非重複経路を考慮している．

同様に医療施設に関する問題に着目した研究として、奥村ら⁷⁹⁾と奥村⁸⁰⁾がある．奥村ら⁷⁹⁾では道路網の耐震化と医療施設の耐震化を統合的に比較して、大規模地震直後の被災者搬送中の死亡リスクを最小化するようなモデルが提案されている．奥村⁸⁰⁾では医療チーム配置と医療施設及び道路の耐震化を計画するモデルが提案されている．

以上では道路整備以外に施設の最適な整備・配置問題にも着目していた．整備費用等を条件として、道路ネットワークの最適な整備計画を扱った研究として、杉浦ら⁸¹⁾、藤原ら⁸²⁾、長江ら⁸³⁾、長江ら⁸⁴⁾、Nagae et al.⁸⁵⁾などがある．杉浦ら⁸¹⁾は緊急輸送道路の整備効率性に着目し、防災拠点間に求められる非重複経路の数を満足する条件の下、2つのレベルの強化整備戦略を選択することで総整備費用を最小化するような緊急輸送道路を指定する緊急輸送道路整備計画

立案モデルを提案した。藤原ら⁸²⁾および長江ら⁸³⁾はリンク上の橋梁の耐震化の便益評価手法を構築している。具体的には、道路施設の損壊による社会的不便益をネットワークの混雑増加として定義し、需要変動型利用者均衡配分を適用してネットワーク損傷時の社会的不便益を計測している。また、これを長江ら⁸⁴⁾において橋梁の耐震化戦略を求める問題へと適用している。ここでは無数に存在するリンク被災パターンに対して、複数の想定シナリオの下で最も発生する確率の高いリンク被災パターンを割り当てる最尤リンク被災パターンを提案している。また、Nagae et al.⁸⁵⁾では災害が発生することで生じる交通不便益の期待値と耐震化費用の和で表される社会的費用を最小化するような耐震化戦略を求めるモデルが提案されている。

最適化問題としての定式化以外のアプローチを試みた研究として、ゲーム理論を援用した喜多・近田⁸⁶⁾がある。この研究では各道路構造物や道路リンク、道路ネットワークをプレイヤーと考え、各道路構造物の耐震レベルの向上による利得と道路ネットワーク全体の利得が同時に最大になるような耐震化戦略を検討する方法が提案されている。

道路ネットワークを介して行われる災害対応は様々あり、いずれの対応に着目するかによって防災対策の戦略も変化する。これゆえに、以上に示したように様々な着眼点での最適な対策戦略に関する研究が行われている。研究の着眼点によって扱われているモデルは様々であるが、いずれの研究においても、より実態に即した入力データや制約、パラメータの与え方を検討するということが共通の課題として挙げられている。

2.3 本研究の位置づけ

「道路の防災機能の評価手法(案)」および前節に述べた4アプローチでの既往研究のレビューを踏まえて、①道路防災対策の方針と相互補完的活用の方針性、②実務への適用性という2つの視点から本研究の位置付けを示す。各視点での位置づけを示す目的を以下に整理する。

① 道路防災対策の方針と相互補完的活用の方針性について

本研究は災害時を想定した道路ネットワーク評価手法の深度化という課題に対して、対策上の新たな視点を持つ手法の開発によって取り組むものである。そこで、各アプローチでの既往研究で提案された対策方針を整理する。これを踏まえて、本研究で提案する「共通するリスクへの対策による道路ネットワークの接続性向上」という対策方針の位置付けを示すとともに、どのような相互補完的活用の方針性がありうるのかを整理する。

② 実務への適用性について

最終的な目的は効果的な防災対策が立案・実施されることであり、そのためには実務への適用の判断材料が示されることが望ましい。そこで、適用性に関する位置づけを整理する。

2.3.1 道路防災対策の方針と相互補完的活用の方向性に関する位置付け

(1) 連結信頼性に関する既往研究との対応関係

連結信頼性に関する研究では様々な道路の構成要素に着目されているが、任意 OD 間の連結確率（信頼度）を評価することで、接続性が維持される可能性が低い OD を抽出することに焦点を当てている点では共通している。これより、連結信頼性に着目した手法の対策方針は「OD 間の連結確率の向上に寄与する箇所への対策による道路ネットワークの接続性向上」と言える。ここで、リンクの連結確率（途絶確率）が道路被害のリスクに対応すると考えると、対策の主効果としてのリスク低減に着目していると言え、本研究と類似した方針を持つ。

ただし、「リンク信頼度をいかに定めるか？」が重要な課題として挙げられており、第1章に示したような様々な道路の被災リスクを連結信頼性評価の枠組みの中でどのように扱うべきかという知見は未だ得られていない。例えば倒木や電柱の倒壊のように道路被害のリスクとなる要素としては認識されていても、多くの要素について、それを信頼度として評価する手法が確立されていないのが現状である。その背景にあるのが被害率関数を構築することの困難さである。リンク信頼度の算出に取り組んだ研究ではいずれも被害率関数が援用されている。被害率関数はその被害がどのようなメカニズムで生じているかが理解されない限り構築できないが、前節に挙げたような被害のメカニズムには未知な部分が多い。一方で、道路被害が生じる可能性という視点では連結信頼性のリンク信頼度に比べて精度は落ちるものの、本研究で提案する手法では連結信頼性の枠組みでは扱えなかったリスクを考慮したネットワーク評価が可能である。既往研究の整理で示したように、主要な道路構造物を対象としたリンク信頼度の定義に関する研究には進展が見られることから、主要な道路構造物を対象とした連結信頼性による評価結果と、道路沿道まで含めた多様な被災リスクを考慮した本研究で提案する手法に評価結果とを合わせることで、対策の検討・立案のための基礎資料としての価値はより高まると考えられ、提言⁸⁷⁾で指摘されたような道路沿道まで含めた道路の被災リスクを評価して対策箇所の優先順位を検討することへ寄与することが期待できる。

(2) 道路ネットワークの脆弱性評価に関する既往研究との対応関係

脆弱性評価に関する研究では、アクセシビリティや旅行時間、迂回距離など多様な評価指標が提案されているものの、いずれも道路被害の影響度合いを交通機能の悪化度合いで捉えようとするものである。このことから、対策方針は「道路ネットワークの交通機能を悪化させる箇所への対策による災害時の道路ネットワークの機能向上」に対応するものと言える。したがって、道路の被災リスクの低減による災害時の道路ネットワークの接続性向上を方針とする本研究とは方針が異なる手法である。

本研究では接続性向上を重視しており、交通機能の悪化度合いは扱っていない。接続性を重視する上で着目すべき箇所、交通機能の悪化を防止する上で着目すべき箇所は異なると考えられ、両者を比較することは対策の検討・立案のための示唆を得る上で有効であると考えられる。

(3) 道路ネットワークの幾何構造に基づく評価に関する既往研究との対応関係

幾何構造に基づく評価に関する研究は、中心性等のネットワークの構造としての特徴量に着目したものから、**Network Science** 分野の知見を援用したものまで幅広く行われている。これらは様々なネットワークの構造としての特徴量の視点から弱点箇所や重要箇所を捉えようとしたものであり、対策方針としては「構造上の弱点箇所あるいは重要箇所への対策による災害時の道路ネットワークの接続性向上」に対応するものである。したがって、道路の被災リスクの低減による災害時の道路ネットワークの接続性向上を方針とする本研究とは方針が異なる。

接続性向上を目的としている点では本研究と共通しているが、それを被災リスクの低減で達成するのか、構造上の弱点箇所あるいは重要箇所への対策で達成するのかでは目的達成の手段として大きく異なる。構造上の弱点箇所あるいは重要箇所が接続性向上を図る上で重要であることは明白であり、それらとリスク低減を図る上で着目すべき箇所とがどのように重なるのか、あるいは重ならないのかを比較・分析することは対策の検討・立案のための示唆を得る上で有効であると考えられる。

(4) 最適化手法等に基づく最適対策戦略に関する既往研究との対応関係

最適化手法等による対策箇所選定に関する研究では、医療施設や医療チームの配置計画、被災者搬送中の死亡リスクや整備費用、社会的費用を最小化する耐震化計画などが扱われている。これを整理すると、対策方針は「ある条件下での最適な対策戦略の実行による道路ネットワークの機能向上」に対応すると言える。道路の被災リスクを低減する（最適化する）ことを主目的とした研究は見られないものの、手法の枠組み自体は社会的費用などによって道路の被災リスクを考慮することが可能であると考えられる。

一方で、与えられた条件下で最適な対策戦略が提示されるものの、より実態に即した入力データや制約、パラメータの与え方を検討するということが共通の課題として挙げられていることを踏まえると、他の手法と結果を比較・分析することが対策の検討・立案のための示唆を得る上で有効に機能する場合もあると考えられる。また、手法の選択段階で「何を条件として最適化するか？」を検討する場合にも、他の手法と比較・分析することは有効であると考えられる。以上のような対策の検討・立案のための分析結果の解釈の補強や手法選択時のツールというような方向性で、本研究で提案する手法との相互補完的活用が有効と考えられる。

(5) まとめ

以上のように、これまでに OD 間の連結確率に着目した手法、アクセシビリティや距離等の道路ネットワークの交通機能に着目した手法、ネットワークの構造的な弱点あるいは重要箇所に着目した手法、ある条件下での最適な対策戦略に着目した手法が提案されてきた。災害の発生や被害の精緻な予測の困難さや地域ごとに異なる実状などを踏まえると、これら手法の中から真に望ましい道路防災対策方針を見極めることは難しい。このような中で道路防災対策を進めていくためには、対策の検討・立案において、これら対策方針の異なる手法を相互補完的に活用して対策決定に至るようなプロセスも必要である。一方で、近年の自然災害での教訓から、対策方針として新たに道路沿道まで含めた多様な道路被害のリスクに着目した評価の必要性も指摘されている⁸⁶⁾。しかし、レビューに示したように、このような方針に対応した手法はこれまでに提案されていない。これを踏まえ、本研究では道路被害のリスクを表現する評価指標として災害危険箇所数指標を新たに提案し、これに基づく評価手法を開発する。本研究は、このような手法の提案によって、対策方針の異なる手法の相互補完的な活用のプロセスを充実化させることを目指すものである。相互補完的な活用の方向性としては、対策方針の異なる既往の各手法での評価結果と、本研究での提案手法による評価結果とを比較・分析することで、対策の検討・立案における有益な示唆の獲得へつなげることを想定している。

2.3.2 本研究で提案する手法の実務への適用性に関する位置づけ

本節では、本研究で提案する手法を実務へ適用しようとする場合の留意点という視点で位置づけを整理する。

2.1.3 項では、「道路の防災機能の評価手法（案）」の基本的な考え方を参考に、実務への適用性を確保する方向性の 1 つとして、「交通量や旅行速度等の発災後の道路状況の推定を伴う条件」と「災害の規模や被害箇所、被害規模等の精緻な推定を伴う条件」の設定を回避して、推定精度を落とした分析条件を課すことも考えられることを述べた。本研究で提案する手法の評価指標である災害危険箇所・災害危険箇所数は分析者によって任意に設定されるものであり、先述した 2 つの推定困難な条件設定は伴わない。この点で、実務への適用性は一定程度担保されることが考えられる。

一方で、災害危険箇所は被災可能性の大小に依らず、被災する可能性があるものを等しく 1 つのリスクとして扱うものである。これによって、道路に被害をもたらすことは認識されているが、その被害確率の定義方法までは十分研究されてこなかったようなリスクを扱うことが可能となる。その一方で、災害危険箇所数が多い箇所が「真の被害確率の視点でも被害の可能性が高い箇所」と一致することは必ずしも保証されない点に留意が必要である。

第 2 章 参考文献

- 1) 国土交通省道路局都市局, 道路の防災機能の評価手法(案): <https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-hyouka/pdf/hyouka.pdf>(2019.12.18 閲覧)
- 2) 国土交通省道路局都市局, 道路ネットワークの防災機能の向上効果計測マニュアル(案): https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-hyouka/pdf/nw_manual.pdf(2019.12.18 閲覧)
- 3) 家田仁, 柳沼秀樹, 堤啓: 新たな道路の防災機能評価手法の開発とその適用事例, 土木施工, Vol.57, No.5, pp.17-20, 2016.
- 4) 場渡真吾, 石原康弘, 山田哲也, 松本一城: 防災機能の評価手法(暫定案)による道路ネットワークの果たす防災機能の分析と考察, 土木計画学研究・講演集, Vol.45, pp.254-256, 2012.
- 5) 国土交通省 社会資本整備審議会 道路分科会第 3 回事業評価部会 配布資料: http://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/road01_sg_000051.html (2019.12.23 閲覧)
- 6) 国土交通省 社会資本整備審議会 道路分科会第 4 回事業評価部会 配布資料: http://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/road01_sg_000054.html (2019.12.23 閲覧)
- 7) 国土交通省 社会資本整備審議会 道路分科会第 5 回事業評価部会 配布資料: http://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/road01_sg_000063.html (2019.12.23 閲覧)
- 8) 国土交通省 社会資本整備審議会 道路分科会第 6 回事業評価部会 配布資料: http://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/road01_sg_000074.html (2019.12.23 閲覧)
- 9) 国土交通省 社会資本整備審議会 道路分科会第 12 回事業評価部会 配布資料: https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/road01_sg_000269.html (2019.12.23 閲覧)
- 10) 若林拓史, 飯田恭敬: 道路網信頼性解析法の開発とライフラインネットワークへの適用性の検討, 土木計画学研究・講演集, No.13, pp.915-922, 1990.
- 11) 飯田恭敬, 北村隆一: 交通工学, オーム社, 2008.
- 12) 若林拓史, 亀田弘行: ロマ・プリエタ地震後のサンフランシスコ湾岸地域の道路網運用の効果分析と災害時の道路網計画, 都市計画論文集, Vol.30, pp.91-96, 1995.
- 13) 若林拓史: 阪神淡路大震災における道路網連結信頼性と確率重要度による重要区間の評価, 土木計画学研究・論文集, No.13, pp.391-400, 1996.
- 14) 若林拓史, 大野隆晴, 鈴木宏章: 14_道路ネットワークの重要度評価: 確率重要度とクリティカリティ重要度による信頼性向上効果, 土木計画学研究・論文集, Vol.22, No.4, pp.751-pp.759, 2005.
- 15) 朝倉康夫, 柏谷増男, 為広哲也: 災害時における交通処理能力の低下を考慮した道路網の

- 信頼性評価モデル, 土木計画学研究・論文集, No.12, pp.475-484, 1995.
- 16) 朝倉康夫, 柏谷増男, 藤原健一郎: 交通ネットワークにおける迂回の限度を考慮した OD ペア間信頼度の指標, 土木学会論文集, No.555/IV-34, pp.41-49, 1997.
- 17) 高山純一, 大野隆: 連結性能から見た道路網の信頼性評価法, 土木計画学研究・講演集, No.11, pp.251-258, 1988.
- 18) 高山純一: 異常気象時における道路網の連結性能評価法, 土木計画学研究・講演集, No.12, pp.559-565, 1989.
- 19) 廣瀬義伸, 近藤光男, 綾貴穂, 山根丈: 地震防災のための道路網および緊急施設整備計画に関する研究, 土木計画学研究・論文集, No.15, pp.329-336, 1998.
- 20) 能島暢呂: ネットワーク信頼性解析に基づく道路網の地震防災戦略について, 第 24 回地震工学研究発表会講演論文集, pp.1293-1296, 1997.
- 21) 能島暢呂, 山中敏裕: 道路ネットワークの地震時機能信頼性解析に基づく施設改善の重要度評価, 第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集, No.J-12, pp.3205-3210, 1998.
- 22) 小野祐輔, 本郷峻介: 地震時の斜面崩壊確率に基づく中山間地の孤立可能性の定量化の試み, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.74, No.4, pp.I_313-I_319, 2018.
- 23) 酒井久和, 奥村誠, 塩飽拓司, 香川敬生, 長谷川浩一, 澤田純男, 多々納裕一: 地震時における斜面の簡易信頼性評価法に関する基礎的研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.69, No.4, pp.I_142-I_147, 2013.
- 24) 小野祐輔, 日比慧慎: 地震時斜面崩壊による道路閉塞を考慮した中山間地の孤立リスク評価: 2004 年新潟県中越地震と 2016 年熊本地震への適用, 日本地震工学会論文集, Vol.19, No.6, pp.232-243, 2019.
- 25) 伊藤詩織, 庄司学: 道路ネットワークの津波災害時における機能支障の定量的評価, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.74, No.4, pp.I_120-I_130, 2018.
- 26) 原田慎也, 栄徳洋平, 戸根智弘, 三木智, 若林拓史: 道路の連結信頼性の実用的な評価方法の提案, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.69, No.5, pp.I_67-74, 2013.
- 27) 安藤正幸, 喜多敏春: 連結信頼性を用いた整備計画策定手法の研究, 構造工学論文集, Vol.62A, pp.114-127, 2016.
- 28) 松田洋一郎, 川村國夫, 平岸純, 喜多敏春, 安藤正幸: 緊急輸送道路の最適管理に向けた道路構造物情報の統合化と耐震化優先度の検討, 交通工学論文集, Vol.2, No.5, pp.31-40, 2016.
- 29) 若林拓史, 飯田恭敬: 交通ネットワーク信頼性解析への信頼性グラフ理論適用の考え方, 土木計画学研究・講演集, No.10, pp.125-132, 1987.

- 30) 飯田恭敬, 若林拓史: ブール代数を用いた道路網ノード間信頼度の上・下限値の効率的算出法, 土木学会論文集, No.395/IV-9, pp.75-84, 1988.
- 31) 飯田恭敬, 若林拓史, 吉木務: ミニマルパス・カットを用いた道路網信頼度の近似計算法, 交通工学, Vol.23, No.4, pp.3-13, 1988.
- 32) 飯田恭敬, 若林拓史, 福島博: 道路網信頼性の近似解析方法の比較研究, 土木学会論文集, No.407/IV-11, pp.107-116, 1989.
- 33) Chan, Y.: A Method to Simplify Network Representation in Transportation Planning, *Transportation Research*, Vol.10, pp.179-191, 1976.
- 34) 高山純一, 大野隆: 連結性能から見た道路網の信頼性評価法, 土木計画学研究・講演集, No.11, pp.251-258, 1988.
- 35) 若林拓史, 飯田恭敬, 吉木務: 道路網信頼性解析へのネットワーク集約法の適用, 土木計画学研究・講演集, No.12, pp.567-574, 1989.
- 36) 安藤正幸, 高山純一, 中山晶一郎, 喜多敏春: トポロジー変換による連結信頼性算定の研究, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.72, No.5, pp.I_707-I_719, 2016.
- 37) 小林俊一, 中山晶一郎, 若林桂汰, 坪川秀太郎: 道路ネットワークの連結信頼性計算の単純化に関する一考察, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.73, No.2, pp.I_33-I_44, 2017.
- 38) 中山晶一郎: ネットワークレベルでの道路交通の信頼性研究の諸相・展望とその便益評価の一考察, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.67, No.2, pp.147-166, 2011.
- 39) Berdica, K.: An introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done, *Transport Policy*, Vol.9, pp.117-127, 2002.
- 40) Taylor, M.A.P., Sekhar, S.V.C. and D'Este, G.M.: Application of accessibility based method for vulnerability analysis of strategic road networks, *Network and Spatial Economics*, Vol.6, pp.267-291, 2006.
- 41) Jenelius, E., Petersen, T. and Mattsson, L-G.: Importance and exposure in road network vulnerability analysis, *Transportation Research*, Vol.40A, pp.537-560, 2006.
- 42) Hansen, W.G.: How Accessibility Shapes Land Use, *Journal of the American Institute of Planners Association*, Vol.25, No.2, pp.73-76, 1959.
- 43) DHAC(Department of Health and Aged Care), Measuring Remoteness: Accessibility/ Remoteness Index of Australia (ARIA) (Revised Edition):
[https://www1.health.gov.au/internet/main/publishing.nsf/Content/E2EE19FE831F26BFCA257BF0001F3DFA/\\$File/ocpanew14.pdf](https://www1.health.gov.au/internet/main/publishing.nsf/Content/E2EE19FE831F26BFCA257BF0001F3DFA/$File/ocpanew14.pdf)(2020.01.31 閲覧).
- 44) Lleras-Echeverri, G. and Sánchez-Silva, M: Vulnerability analysis of highway networks, methodology and case study, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Transport*, Vol.147,

- pp.223-230,2001.
- 45) Sohn, J.: Evaluating the significance of highway network links under the flood damage: An accessibility approach, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol.40, pp.491-506, 2006.
 - 46) Chang, S. E. and Nojima, N: Measuring post-disaster transportation system performance: the 1995 Kobe earthquake in comparative perspective, *Transportation Research Part A*, Vol.35, pp.475-494, 2001.
 - 47) Chang, S. E.: Transportation planning for disasters: an accessibility approach, *Environment and Planning A*, Vol.35, pp.1051-1072, 2003.
 - 48) 原田剛志, 倉内文孝, 高木朗義: リダンダンシーを考慮したアクセシビリティに基づく道路ネットワークの接続脆弱性評価, 土木計画学論文集 D3 (土木計画学), Vol.70, No.1, pp.76-87, 2014.
 - 49) 大澤脩司, 藤生慎, 中山晶一郎, 高山純一: 地震に対する道路網の脆弱区間評価手法の構築と緊急輸送道路網への適用, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.73, No.4, pp.I_467-I_478, 2017.
 - 50) 堀井雅史: 迂回度を用いた自然災害時における道路網の代替機能に関する評価方法, 日本都市計画学会学術研究論文集, Vol.31, pp.769-774, 1996.
 - 51) 南正昭, 高野伸栄, 佐藤馨一: 道路網における代替ルートの整備水準の一評価法に関する研究, 土木学会論文集, No.530/IV-30, pp.67-77, 1996.
 - 52) Kurauchi, F., Sumalee, A., Tamura, H. and Uno, N.: Bi-level programming problem for analyzing capacity vulnerability in a transportation network under limited damage, *Proceedings of the Third International Symposium on Transportation Network Reliability*, 2007.
 - 53) Kurauchi, F., Uno, N., Sumalee, A. and Seto, Y.: Network evaluation based on connectivity vulnerability, *Transportation and Traffic Theory 2009: Golden Jubilee*, pp.637-649, 2009.
 - 54) 鎌谷崇史, 中尾聡史, 樋野誠一, 毛利雄一, 片山慎太郎, 東徹, 川端祐一郎, 藤井聡: 大規模震災に対する各地域の道路ネットワークレジリエンス評価, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.75, No.5, pp.I_353-I_363, 2019.
 - 55) Jenelius, E and Mattsson, L-S.: Road network vulnerability analysis of area-covering disruptions: A grid-based approach with case study, *Transportation Research Part A*, pp.746-760, 2012.
 - 56) 倉内文孝: Network Science を援用した交通ネットワーク信頼性分析の可能性, 土木計画学研究・講演集, Vol.55, CD-ROM, 2017.
 - 57) Demetrius, L. and Manke, T.: Robustness and network evolution—an entropic principle, *Physica A*, Vol.346, pp.682-696, 2005.
 - 58) Fiedler, M.: Algebraic connectivity of graphs, *Czechoslovak Mathematical Journal*, Vol. 23, No. 2,

- pp.298-305, 1973.
- 59) Bell, M.G.H., Kurauchi, F., Perera, S. and Wongc, W.: Investigating transport network vulnerability by capacity weighted spectral analysis, *Transportation Research Part B*, Vol.99, pp.251-266, 2017.
 - 60) Nourzad, S.H.H. and Pradhan, A.: Vulnerability of Infrastructure Systems: Macroscopic Analysis of Critical Disruptions on Road Networks, *Journal of Infrastructure Systems*, Vol.22(1), pp.04015014-1 - 04015014-13, 2016.
 - 61) 中南孝晶, 中山晶一朗, 小林俊一, 山口裕通: 固有値解析による固有ベクトルを利用した緊急輸送道路ネットワークの脆弱性評価, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.74, No.5, pp.I_1141-1148, 2018.
 - 62) 坪川秀太朗, 若林桂汰, 小林俊一, 中山晶一朗: バネ質点系の力学アナロジーを用いた道路ネットワークのリンク重要度のトリアージ手法について, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.74, No.2, 2018.
 - 63) Akbarzadeh, M., Reihani, S.F.S. and Samani, K.A.: Detecting critical links of urban networks using cluster detection methods, *Physica A*, Vol.515, pp.288-298, 2019.
 - 64) 土屋哲, 岩田千加良, 谷本圭志: 区間重複を考慮した地方都市道路網の冗長性指標に関する一考察, 地域安全学会論文集, No.30, pp.35-41, 2017.
 - 65) Stephenson, K and Zelen, M.: Rethinking centrality: Methods and examples, *Social Networks*, Vol.11, No.1, pp.1-37, 1989.
 - 66) 竹之内洋樹, 森田哲夫, 藤田慎也: 防災船着場整備による負傷者搬送への効果に関する研究ー東京都江東区を対象としてー, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.70, No.5, pp.I_63-I_73, 2014.
 - 67) 小林俊一, 若林桂汰, 坪川秀太朗, 中山晶一朗: 固有ベクトル中心性の概念を拡張したネットワーク上の拠点ノード抽出および領域分割手法の提案, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.74, No.5, pp.I_747-I_760, 2018.
 - 68) 羽深裕希, 丸山善久: 移動効率に着目した高知県における広域物資拠点の選定, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.71, No.4, pp.I_257-264, 2015.
 - 69) Demšar, U., Špatenková, O., Verrantaus, K.: Identifying Critical Locations in a Spatial Network with Graph Theory, *Transactions in GIS*, Vol.12(1), pp.61-82, 2008.
 - 70) Shimbel, A.: Structural parameters of communication network, *Bulletin of Mathematical Biophysics*, Vol.15, pp.501-507, 1953
 - 71) Freeman, L.C.: Centrality in social networks conceptual clarification, *Social Networks*, Vol.1, No.3, pp.215-239, 1979.
 - 72) Bonacich, P.: Factoring and weighting approaches to status scores and clique identification, *The Journal of Mathematical Sociology*, Vol.2, No.1, pp.113-120, 1972.

- 73) Hillier, B., Hanson, J.: *Social Logic of Space*, Cambridge University Press, 1984.
- 74) 増田直紀, 今野紀雄: 複雑ネットワーク 基礎から応用まで, 近代科学社, 2010.
- 75) 田島雅己, 本間裕太: 複数経路の空間的關係に着目した交通ネットワークの頑健性評価, 都市計画論文集, Vol.53, No.2, pp.199-205, 2018.
- 76) 近藤竜平, 塩見康博, 宇野伸宏: アクセシビリティと連結信頼性を考慮した道路網・医療施設配置計画モデル, 土木計画学研究・論文集, Vol.27, No.3, pp.579-588, 2010.
- 77) 瀬戸裕美子, 宇野伸宏, 塩見康博: 非重複経路を考慮したアクセシビリティ指標に基づく医師配置計画モデルの構築, 都市計画論文集, Vol.45, No.3, pp.487-492, 2010.
- 78) 瀬戸裕美子, 宇野伸宏, 塩見康博: 非重複経路を考慮したアクセシビリティ指標に基づく医療施設配置計画, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.67, No.5, pp.I_57-I_68, 2011.
- 79) 奥村誠, 堀内智司, 佐々木和寛: 地震被災者搬送のための道路・医療施設耐震化計画モデル, 土木計画学研究・論文集, Vol.26, No.1, pp.93-100, 2009.
- 80) 奥村誠: 重傷者輸送と医療チームの派遣を考慮した最適道路・医療施設耐震化計画モデル, 都市計画論文集, Vol.45, No.3, pp.577-582, 2010.
- 81) 杉浦聡志, 倉内文孝, 高木朗義: 複数経路の確保を前提とした耐震化費用を最小とする緊急輸送道路整備計画立案モデルの構築, 土木計画学論文集 D3 (土木計画学), Vol.74, No.5, 2018.
- 82) 藤原友, 長江剛志, 朝倉康夫: GIS と需要変動型利用者均衡配分を用いた道路ネットワーク耐震化の便益評価, 土木計画学研究・講演集, Vol.34, Paper No.188, 2006.
- 83) 長江剛志, 藤原友, 朝倉康夫: GIS と需要変動型利用者均衡配分を用いた道路ネットワーク耐震化の便益評価, 土木計画学研究・論文集, Vol.24, No.2, 2007.
- 84) 長江剛志, 藤原友, 朝倉康夫: 利用者均衡配分を内生化した都市圏道路ネットワークの耐震化問題, 土木計画学研究・講演集, Vol.37, CD-ROM, 2008.
- 85) Nagae, T., Fujihara, T. and Asakura, Y.: Anti-seismic reinforcement strategy for an urban road network, *Transportation Research Part A*, Vol.46, No.5, pp.813-827, 2012.
- 86) 喜多敏春, 近田康夫: 道路ネットワークを考慮した道路構造物耐震補強の優先順位設定におけるゲーム理論の適用, 構造工学論文集, Vol.59A, pp.244-251, 2013.
- 87) 道路の耐災害性強化に向けた有識者会議, 道路の耐災害性強化に向けた提言－教訓から学び、教訓を超えて－: <https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/sdt/pdf/t02.pdf> (2020.01.13 閲覧)

第3章 災害危険箇所数を指標とした道路の災害リスク評価手法の構築

3.1 はじめに

第2章までに、道路防災分野における我が国の課題である評価手法の深度化のためには、新たな対策方針として道路沿道まで含めた多様な道路被害のリスクに着目した評価手法を開発することが必要であることを指摘した。

このために、本章では、道路ネットワークにおける道路被害のリスクを捉えるため、災害危険箇所数という評価指標を提案し、その定義と設定事例を整理する。加えて、これを基に「共通するリスクへの対策による道路ネットワークの接続性向上」という対策方針を持つ評価手法を構築する。ところで、道路ネットワークは人や物資の移動を伴う各種災害対応を支える基盤施設であり、災害時にこれら対応が実施可能な状態である（機能を持つ）ことが求められる。これより、道路防災対策は、道路ネットワークの機能向上に加えて災害対応の実施可能性を向上させることもその目的に含むと解釈できる。災害対応の実施可能性には対応実施の確実性と対応の迅速性（円滑性）の2要素が挙げられる。これを踏まえ、本章では「対応実施の確実性」に着目した手法と、「対応実施の確実性」に加えて「対応の迅速性」にも着目した手法の2手法をそれぞれ構築する。また、構築した各手法を単純仮想ネットワークに適用し、提案手法の挙動確認を行なうとともに、提案手法による評価の全体像を解説する。

3.2 災害危険箇所の定義とその設定事例

3.2.1 災害危険箇所の定義

災害危険箇所とは「分析者が道路被害のリスクがあると認識している箇所」と定義付ける。この定義により、災害危険箇所は分析者の道路防災に対する方針次第で柔軟に定義付けられる余地を持つ概念となる。これは、どこまでが道路被害のリスクであるかという絶対的な基準が存在しないことを理由とする。すなわち、分析者の「何をリスクとして認識するか」、「どこま

で対策の必要があると考えるか」という道路防災に対する考えを重視した概念である。なお、災害危険箇所数指標は、リンクや経路上に存在する災害危険箇所の総数を示す。

このような定義付けによって、災害危険箇所は（分析者が認識する限りの）道路ネットワーク上の災害リスクに相当すると解釈できる。このため、本章で構築する道路ネットワーク評価手法を特に道路の災害リスク評価手法と位置づけている。

3.2.2 災害危険箇所の設定事例

災害危険箇所の設定における着眼点・検討手順の例示のため、いくつかの事例を提示する。ここでは地震災害を想定し、建物倒壊、橋梁の落橋・損傷、斜面崩壊について事例を示す。

(1) 建物倒壊に伴う道路閉塞を想定した災害危険箇所の設定事例

建物倒壊を原因とする道路閉塞には、建物の構造形式や建築年代・建物の高さ・建物の立地地点・地震動の規模などが影響する。建物の被害率関数⁹⁾より、同規模の地震動に対しては構造形式が非木造である建物の方が木造の建物に比べて被害の可能性は低い。同様に、建物の建築時に適用された耐震基準の違いにより建築年代が新しいほど被害の可能性は低い。また、道路沿道に建物が立地しているケースでも低層の建物であったり道路から十分離れた位置に建物が立地していたりする場合には倒壊による道路閉塞への影響は限定的である。そして、建物に作用する地震動の規模が小さければ被害を生じる可能性は明らかに低い。これらを踏まえた上で、どこまでの条件を満たした場合に災害危険箇所に該当する建物であるかを判断する必要がある。ここでは、判断基準を以下のように設定した。加えて各条件のチェック方法を例示する。

なお、各条件をチェックするためには、評価対象地域全域に渡る構造形式・耐震化の有無・個別の立地地点・高さの情報を持つ建物の空間データが必要となる。ただし、このような空間データが存在することは必ずしも保証されない。そこで、ここでは特に不足しがちな構造形式と耐震化有無の情報を補完しながら条件をチェックする方法を述べる。なお、このチェック作業では GIS 等の空間データを処理可能なソフトウェアを利用することを前提としている。

【災害危険箇所に該当する建物の判定条件とその設定理由（例）】

- i) **想定地震動が計測震度 5.5（震度 5 強）以上である**
建物の被害率関数¹⁾から読み取れるように、木造建物の被害確率が増加し始める地震動の規模が計測震度 5.5 である。また、対象建物のスクリーニングの意味も持つ。
- ii) **構造形式が木造である**
建物の被害率関数¹⁾が示すように、構造形式が非木造である建物の被害確率が全体的に低い。これより非木造建物では道路閉塞に影響するほどの被害は発生しないと想定。
- iii) **未耐震建物である**
耐震化された建物では道路閉塞に影響するほどの被害は発生しないと想定。
- iv) **建物の平面重心から描画した建物の高さを半径とするバッファ内にリンクを含む**
建物が損傷・倒壊してもその影響範囲内に道路が存在しなければ道路閉塞は生じない。この影響範囲は建物の高さで道路からの距離に依存すると考えられる。

建物空間データの取得・情報補完には、UDDIN ら²⁾の手法を援用する。UDDIN ら²⁾は緊急輸送道路の災害リスクを考慮した市町村役場間の到達可能性の分析の過程で、建物空間データを作成する方法を提案している。誰もが入手可能なデータを使用していること、本研究との関連が深い目的を持った研究であることから、援用できると考えた。方法の詳細は UDDIN ら²⁾に譲り、ここでは概要を示す。建物個別の空間分布とその高さは一般販売されている地図データから取得する。これに対して、構造形式はそこに付属する建物用途の情報から判断する。

まず条件 i) のチェック方法を示す。建物の空間分布と道路ネットワーク評価における想定地震動の予測地図を重ね合わせ、各建物に想定計測地震動情報を付与する。次に、付与された想定計測地震動が 5.5 以上である建物を災害危険箇所（建物）の 1 次候補として抽出する。

次に、条件 ii) および条件 iii) のチェック方法を示す。UDDIN ら²⁾の場合、地震動に対する弱さの特徴量として建築年代を適用することを選択しており、耐震化の有無は扱っていない。そこで、本研究ではこれに換えて対象地域の未耐震建物率を用いて、木造建物にランダムに未耐震建物属性を付与することとした。具体的には、式(3.1)のように、対象地域各地区における 1 次候補の全木造建物数に未耐震建物率を乗じて未耐震建物数を算定し、その数だけランダムに建物データへ未耐震建物属性を付与し、災害危険箇所（建物）の第 2 次候補として抽出する。

$$N_{bl,i}^{ner} = N_{bl,i} \times r_{ner,i} \quad (3.1)$$

ここで,

$N_{bl,i}^{ner}$: 地域 i での未耐震木造建物数, $N_{bl,i}$: 地区 i の1次候補の全木造建物数,

$r_{ner,i}$: 地区 i の未耐震建物率

最後に条件 iv) のチェック方法を述べる. まず, 第2次候補の各未耐震木造建物の平面上での重心位置を求める. これは, データソースとした地図データにおける建物ポリゴンの重心位置を求める作業に等しい. 次にその重心位置から建物高さに相当する半径を持つ円形バッファを作成する. このバッファ内にリンクが含まれる場合には, 倒壊時に当該リンクの閉塞に影響する建物, すなわち災害危険箇所(建物)として抽出する. なお, 交差点付近の建物であるなど, バッファ内に複数のリンクを含む場合には, そのすべてのリンクの道路閉塞に影響する建物であると判定する. 以上の手順を概念図化したものが図-3.1である.

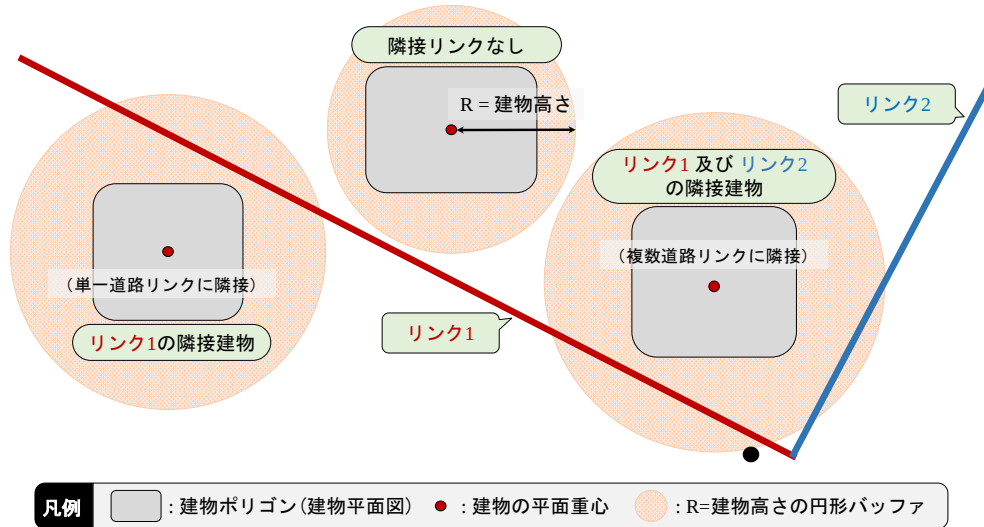


図-3.1 道路閉塞に影響する建物の抽出方法の概念図

(2) 橋梁の落橋・損傷を想定した災害危険箇所の設定事例

近年の地震災害における通行止めを伴う橋梁の被害事例を俯瞰すると、橋梁の落橋・損傷は様々な要因で生じている。しかし、橋梁全般の災害危険箇所の判断に適用できるような要因は未だ明らかでない。そこで、橋梁全般に適用でき、かつ災害危険箇所を峻別可能な要因として、ここでは劣化の有無に着目する。一般的に、劣化した橋梁の場合は本来の性能（設計性能）を発揮することはできないため、被害を生じる可能性が高いと考えることができる。このような落橋・損傷要因を支持した時、どのような劣化条件を災害危険箇所の判断条件とするか定める

必要がある。ここでは、以下の条件を災害危険箇所の判断条件として設定するとともに、各条件のチェック方法を例示する。なお、このチェック作業では GIS 等の空間データを処理可能なソフトウェアを利用することを前提としている。

【災害危険箇所に該当する橋梁の判定条件とその設定理由（例）】

- i) **想定地震動が計測震度 5.5（震度 5 強）以上である**
東日本大震災における橋梁被害に関する報告書³⁾より、通行止めとなるレベルの被害が生じる地震動の規模を計測震度 5.5 と判断。
- ii) **計画的な維持管理（予防保全）を要するレベル以上の劣化状態である**
劣化の進展によって被害を生じる可能性が増大する前の段階で対策候補に含めるべきであるという方針を想定。

本手法を適用する分析者には、道路管理者など自らが管理する道路施設の情報を保有した立場の者を想定している。この前提に立つと、対象地域の橋梁の立地地点および劣化の情報（定期点検結果等）の管理情報と想定地震動の予測地図とを重ね合わせ、各橋梁に想定計測地震動情報を付与すれば良い。このような重ね合わせを行った後、想定計測地震動が 5.5 以上であり、かつ劣化状態が計画的な維持管理（予防保全）を要するレベル以上の状態である橋梁を最終的な災害危険箇所（橋梁）として抽出する。

(3) 斜面崩壊を想定した災害危険箇所の設定事例

平成 30 年北海道胆振東部地震後に、「地震によって発生する土砂災害は極めて突発的であることが一般的であり、地震直後の崩土による襲撃を回避するためには、少なくとも既往の土砂災害警戒区域等におけるハード対策を推進することが望ましい。」という緊急提言⁴⁾が砂防学会から出されている。これを踏まえると、現状で災害の危険があると認識されている箇所は災害危険箇所に設定する必要がある。そこで、ここでは以下のような条件の斜面を災害危険箇所に設定するとともに、各条件のチェック方法を例示する。なお、このチェック作業では GIS 等の空間データを処理可能なソフトウェアを利用することを前提としている。

まず、条件 i) と条件 ii) に対するチェックを行い、道路ネットワークと斜面の対応付けを行なう。条件 i) については、土砂災害警戒区域データと道路ネットワークとを重ね合わせ、区域内にリンクを含む土砂災害特別警戒区域を災害危険箇所（斜面）の候補として抽出する。条件 ii) については、斜面防災点検データの中から、崩壊の危険性や対策の必要が指摘されている斜面を災害危険箇所（斜面）の候補として抽出する。

【災害危険箇所に該当する斜面の判定条件とその設定理由（例）】

i) 区域内にリンクを含む土砂災害特別警戒区域である

本区域では土砂災害の危険性を解消する対策を実施しない限り開発行為が許可されないなど、土砂災害警戒区域に比べ厳しい条件を付されている（表-3.1）。

ii) 斜面防災点検において崩壊の危険性や対策の必要性が指摘された斜面である

将来的な崩壊の危険性・対策の必要性が指摘されているが未対策であるため。

iii) 想定地震動が計測震度 5.5（震度 5 強）以上である

土砂災害の発生密度は必ずしも地震動の規模との関係性が見られない場合もあるが、被害の危険性を論じる際にしばしば閾値に用いられる規模として計測震度 5.5 を想定。

最後に条件 iii) をチェックする。候補として抽出した各斜面データと想定地震動の計測震度の予測地図を重ね合わせ、各斜面に想定計測地震動情報を付与する。次に、付与された想定計測地震動が 5.5 以上である斜面を最終的な災害危険箇所（斜面）として抽出する。

表-3.1 土砂災害警戒区域の区域区分とその詳細⁵⁾

区域区分	区分の詳細・規制等	
土砂災害 警戒区域	区分	急傾斜地の崩壊等が発生した場合に、住民等の生命又は身体に危害が生じるおそれがあると認められる区域であり、危険の周知、警戒避難体制の整備が行われる。
	規制等	・市町村地域防災計画への記載 ・災害時要支援者関連施設の警戒避難体制 ・土砂災害ハザードマップによる周知の徹底 ・宅地建物取引における措置
土砂災害 特別警戒 区域	区分	急傾斜地の崩壊等が発生した場合に、建築物に損壊が生じ住民等の生命又は身体に著しい危害が生ずるおそれがあると認められる区域で、特定の開発行為位に対する許可制、建築物の構造規制等が行われる。
	規制等	・特定開発行為に対する許可制 ・構造物の構造の規制 ・建築物の移転等の勧告及び支援措置 ・宅地建物取引における措置

3.3 災害危険箇所数を指標とした道路の災害リスク評価手法のフレームワーク

3.3.1 災害リスク評価手法としての基本的な考え方とフレームワーク

本項では、前節で定義を示した災害危険箇所数を指標とした道路の災害リスク評価手法について、その基本的な考え方と、それを踏まえた評価手法のフレームワークを示す。

本提案手法では、道路ネットワーク上の災害危険箇所を設定し、その数をネットワークのコストと捉える。このコストを基に災害対応の拠点となる施設間（拠点ペア間）の経路の総コストを算出し、各拠点ペアにおける災害リスクを評価する。この災害リスクが小さいほど災害時に接続性が維持されやすい状態（接続性が高い状態）であると考え、より多くの拠点ペアの災害リスクを軽減できるようなリンクを抽出する。この時、多くの経路が共通して通過している箇所ほど、対象とした拠点ペア全体で災害リスクを軽減できる見込みが高いと考えられる。そこで、対策の方針として「共通するリスクへの対策による道路ネットワークの接続性向上」を掲げる。また、接続性が維持される可能性が高まることは、その拠点ペアで災害対応が実施できる可能性が高まることと同義である。したがって、災害リスクを低減させることを災害対応の確実性を向上させるアプローチであると考え、以上が本提案手法の基本的な考え方である。

次に、この基本的な考え方に対応する評価手法のフレームワークを検討する。上記対策方針を満足する上で重要な要素は「共通区間」と「拠点ペア間の災害リスク」の2要素である。まず、拠点ペア間の経路は最も災害危険箇所数（災害リスク）の少ない経路と定義する。これは拠点ペア間における最小の災害リスクを評価することに等しい。この経路が各拠点ペアにおける対策候補であり、リスクの低い経路のリスクを更に低減することを目指すことを意図している。次に、各リンクを通過する経路数を算出し、より多くの経路が通過する「共通区間」を抽出する。この時、本区間は全拠点ペア間を少ないリスクで行き来する上で頻繁に利用される区間であると解釈できる。最後に、より多くの拠点ペアの災害リスクを軽減できるようなリンクを対策上の注目度が高いリンクとみなす。これを抽出するために各リンクの通過経路数と災害危険箇所数の2変数から構成されるリンクの対策注目度指標を構築する。なお、本指標は対象とした拠点ペア全体に効果が及ぶ対策を行なうことを前提に活用されることを想定している。

なお、2.1.4節にて基礎情報の拡充につながる課題として整理した2要素は、それぞれ以下のような考え方で考慮されている。また、表-3.2に上記フレームワークで提供可能な対策の検討・立案のための基礎情報の一覧を整理した。

i) 課題1：拠点ペアの評価が一律同値とならないような評価構造とする

拠点ペア間の評価と経路の評価は同義である。有限値である災害危険箇所数の大小に基づく経路評価とすることで自然とこのような評価構造が達成される。

ii) 課題2：対象とされる経路集合が評価全体に渡って統一されていること

共通区間は各拠点ペア間で求めた全ての経路を対象として算定される。他に経路の情報を使用する変数・指標はないため、経路集合が統一して扱われることが保証される。

表-3.2 本提案手法のフレームワークで提供可能な対策検討・立案のための基礎情報一覧

	要素	基礎情報と情報の活用例	
1	共通区間	情報 活用例	各リンクにおける通過経路数 拠点ペア間を行き来する際に頻繁に通過されるリンクはどこか
2	拠点ペア間の経路	情報 活用例	各ペア間での経路情報 各ペア間でのリスクの低い経路のリンク構成
3	拠点ペア間の経路	情報 活用例	各ペア間での経路の累積災害危険箇所数 各ペア間での経路の災害リスクはどの程度か
4	対策注目度指標	情報 活用例	各リンクにおける対策注目度指標値 多数の拠点ペア間の災害リスク低減に寄与するリンクはどこか
5	災害危険箇所数	情報 活用例	災害危険箇所または各リンクの災害危険箇所数 どこにどのような災害危険箇所がどの程度あるか
6	拠点ペア間の経路 と災害危険箇所	情報 活用例	拠点ペア間の経路情報とその経路上の災害危険箇所・災害危険箇所数 その経路のリスクを増加させる要因になっているリンクはどこか

3.3.2 道路の災害リスクの評価方法と評価フロー

前項に述べた基本的な考え方に沿い、具体的な災害リスクの評価方法とそのフローを述べる。

災害リスクの評価は、①災害リスク評価の条件設定、②各リンクの災害危険箇所の該当判定、③各リンクの災害危険箇所数の集計、④災害危険箇所に基づく各拠点ペアの経路評価、⑤各リンクの対策注目度の算出という大きく5つのフローから構成される（図-3.2）。

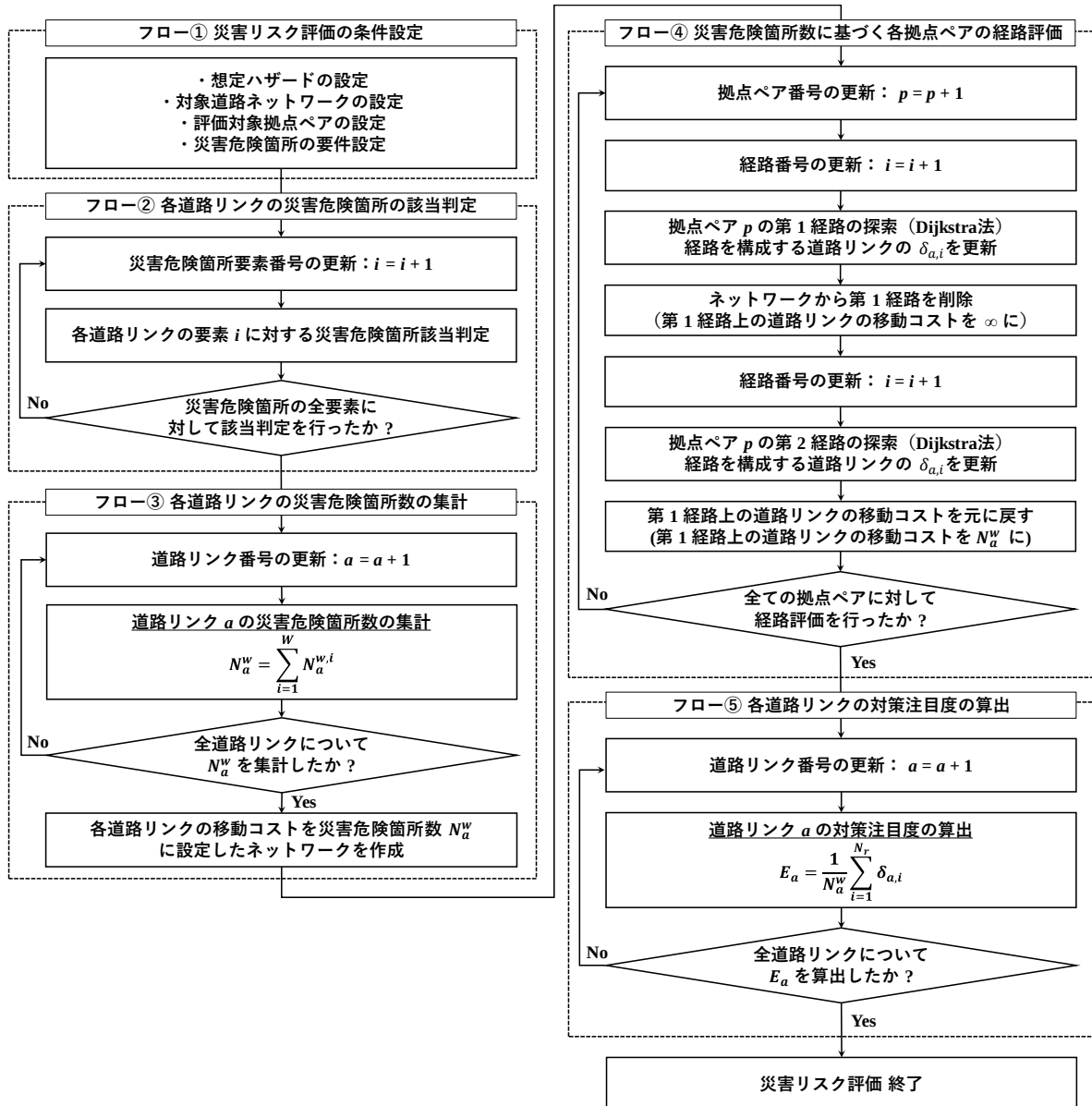


図-3.2 災害危険箇所数を指標とする災害リスク評価のフロー図

(1) 災害リスク評価の条件設定

想定ハザード、対象道路ネットワーク、評価対象の拠点ペア、災害危険箇所の用件の4種を災害リスク評価における基本条件として設定する。なお、これらは、想定する災害の規模・対策の実施を想定するエリア・想定する災害対応の種類・対策水準に対する方針など、分析者の想定や方針等に基づいて任意かつ柔軟に設定されるべきものである。

(2) 各リンクの災害危険箇所の該当判定

各種道路構造物の管理データや地理空間情報等を用いて、フロー(1)で定義した要件に該当する災害危険箇所を抽出し、リンクと関連付ける。

(3) 各リンクの災害危険箇所数の集計

未耐震建物のような要因や、劣化橋梁と土砂災害特別警戒箇所の双方を含む場合のように、災害危険箇所の要件次第では単一のリンクに複数の災害危険箇所を定義しうる。そこで、フロー(2)が終了した時点で各リンクに定義された災害危険箇所数を集計する（式(3.2)）。

$$N_a^w = \sum_{i=1}^W N_a^{w,i} \quad (3.2)$$

ここで、

N_a^w ：リンク a の災害危険箇所数、 $N_a^{w,i}$ ：リンク a の要素 i に関する災害危険箇所数

W ：災害危険箇所の要素集合

(4) 災害危険箇所数に基づく各拠点ペアの経路評価

各拠点ペア間には無数の経路が存在する．この内1本でも経路が残存すれば災害時でもその拠点間の接続性は維持される．このため，対策候補とする経路の絞り込みが重要になる．基本的な考え方に述べたように，対策候補とする経路は各拠点ペア間で最も災害危険箇所数（災害リスク）の少ない経路である．これは，災害リスクが低いほど接続性が維持される可能性も高いことから，そのリスクを更に低減することで接続性維持の可能性を高めることを意図している．このような経路を求めるために，災害危険箇所数をネットワークコストとした最短経路探索を実行する．この方法で抽出した経路は，確かにその拠点ペア間で最も災害リスクが低い経路である．しかし，接続性が確実に確保されることまでは保証されない．これより，経路の冗長性が確保されていることが望ましいという考えを持つことができる．この時，複数ある経路に含まれる共通リンクが少ないほど冗長性は高い．以上を踏まえ，本研究では冗長性確保を目的として，第1経路と可能な限り重複しない経路の中で最も災害リスクが低い経路（以下，第2経路）を抽出することを考える．第2経路は南ら⁶⁾の考え方を参考に，第1経路を削除したネットワークで再度最短経路探索を実行することで求める．ただし，原田ら⁷⁾が指摘するようにこの方法は途中でネットワークが途切れてしまう時に正しく経路を求められない問題をはらんでいる．そこで，第1経路に含まれるリンクでも，そこを通過する以外に目的地へ到達できない場合には，そのリンクに限って通過を許すという緩和条件を設けることとした（図-3.3）．

なお，ここでは最短経路探索の手法として Dijkstra 法を適用する．

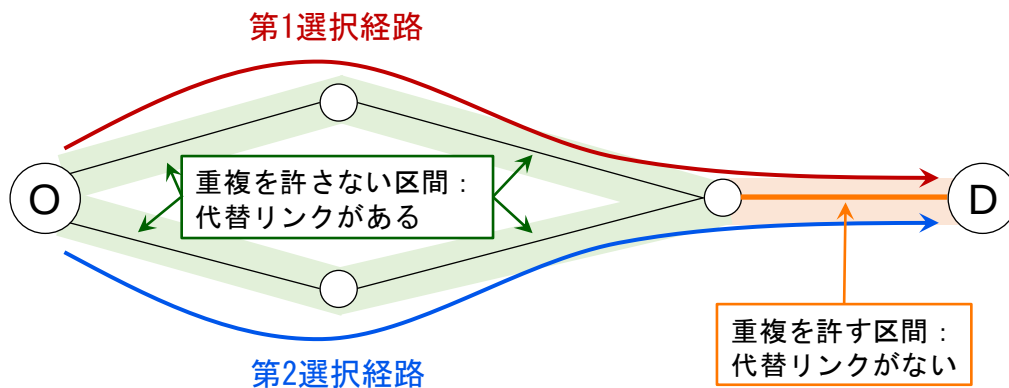


図-3.3 第2経路抽出のための緩和条件の説明図

(5) 各リンクの対策注目度の算出

すべてのリンクや災害危険箇所に対策することは困難である。このため、道路防災対策上特に注目すべきリンクを評価・抽出することが必要となる。このために、基本的な考えでは「より多くの拠点ペアの災害リスクを軽減できるようなリンクを対策上の注目度が高いリンクとみなす」と述べた。これには多数の経路が通過する「共通区間」にあたるリンクが該当する。ここで、通過経路数が同数になる場合があり得る。そこで、このような場合に対する注目度の判断基準を加える。ここでは、「少ない対策でより大きな効果が得られることが望ましい」という基準を設ける。この視点により、各リンクの注目度指標を式(3.3)のように定義した。

$$E_a = \begin{cases} \frac{1}{N_a^w} \sum_{i=1}^{N_r} \delta_{a,i}, & N_a^w > 0 \\ 0, & N_a^w = 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

ここで、

E_a : リンク a の対策注目度, N_a^w : リンク a の災害危険箇所数, N_r : 全経路数,

$\delta_{a,i}$: リンク a が経路 i に含まれるときに 1, そうでないときに 0

式(3.3)では各リンクの通過経路数をそのリンクの災害危険箇所数で除して、1 災害危険箇所あたりの通過経路数を求めている。この値は 1 箇所の災害危険箇所への対策によってリスクが低減する経路の本数に等しい。すなわち、本指標は少ない対策箇所でより多くの経路のリスクを低減できるリンクを重要視するという対策方針下で運用されることを想定したものである。また、このような対策方針が適用される背景には以下のような検討プロセスを想定した。

- i) 対策の方向性としては、少数の経路のリスクを大きく低減するか、それよりリスクの低減幅は小さくなるが多数の経路のリスクを低減するかの 2 つが考えられる。
- ii) 一方、対策候補の経路は、ネットワーク全体で見ればその中では接続性が高いものである。
- iii) この時、既に接続性が高い経路に対して、その一部に着目するより、多数の経路に着目して拠点ペア全体の接続性を底上げすることの方が望ましいと考える。

3.3.3 単純仮想ネットワークへの適用

単純仮想ネットワークへ提案手法を適用し、本手法による災害リスク評価の平易な事例を示す。具体的には、図-3.4に示すような9ノード、12リンクの田の字形単純仮想ネットワークに適用する。各リンクの移動コスト、すなわち災害危険箇所数は図-3.4中の各リンク上に示したボックスの2段目に記載された数値に対応する。そして、ネットワーク評価におけるOD設定である拠点ペア設定は、図-3.4中右下に示した表の通りの全3拠点ペアとした。

本単純仮想ネットワークにおける災害リスク評価結果のうち、各拠点ペアの経路評価の結果を図-3.5に、各リンクに対する対策注目度の算出結果を図-3.6にそれぞれ示す。ここでのネットワーク条件に従うと、各リンクの通過経路数および対策注目度は図-3.6中の右表のように整理される。図-3.6より、対策注目度としてはリンク3が最も高く、リンク6およびリンク12、リンク1の順に続く。今回の条件では拠点ペアは3組であり、第1経路と第2経路とで重複せざるをえないリンクが生じることのないネットワーク構造となっている。したがって、各リンクの最大通過経路数は3である。リンク1およびリンク3はいずれも通過経路数は最大の3である。リンク1の災害危険箇所数が2であるのに対してリンク3の災害危険箇所数は1であるので、式(3.3)に従えばリンク3の方が、対策注目度が高く評価される。さて、リンク2の対策注目度は昇順では4番目であり、通過経路数が2であるリンク6およびリンク12より低い。これは、これら2つのリンクの災害危険箇所数がいずれも1であるため、式(3.3)に従えばリンク1よりも対策注目度が高く評価されるためである。

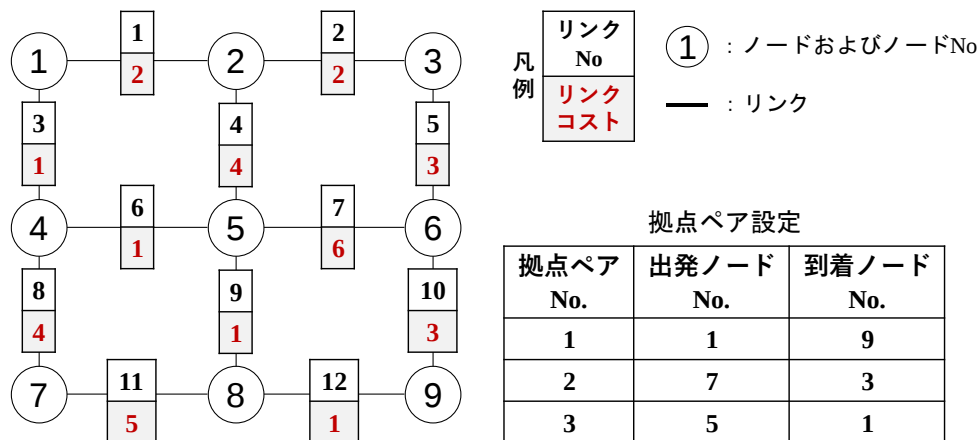


図-3.4 単純仮想ネットワーク図

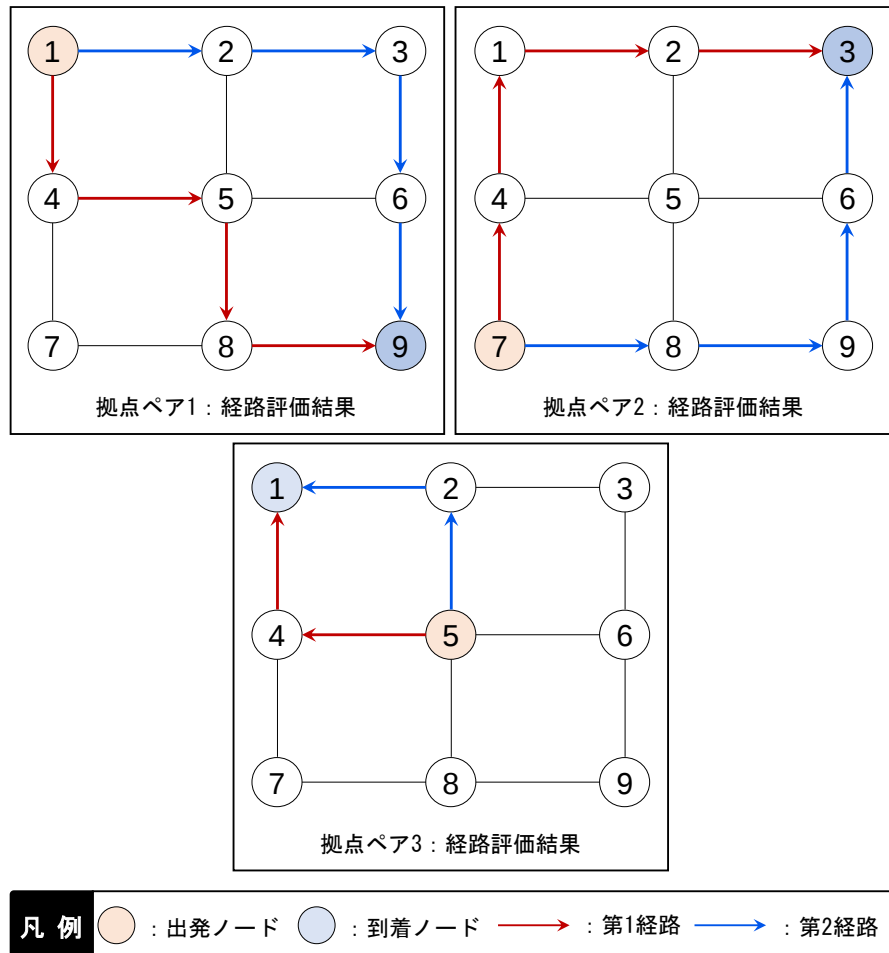


図-3.5 単純仮想ネットワークにおける災害リスク評価結果その1（経路評価）

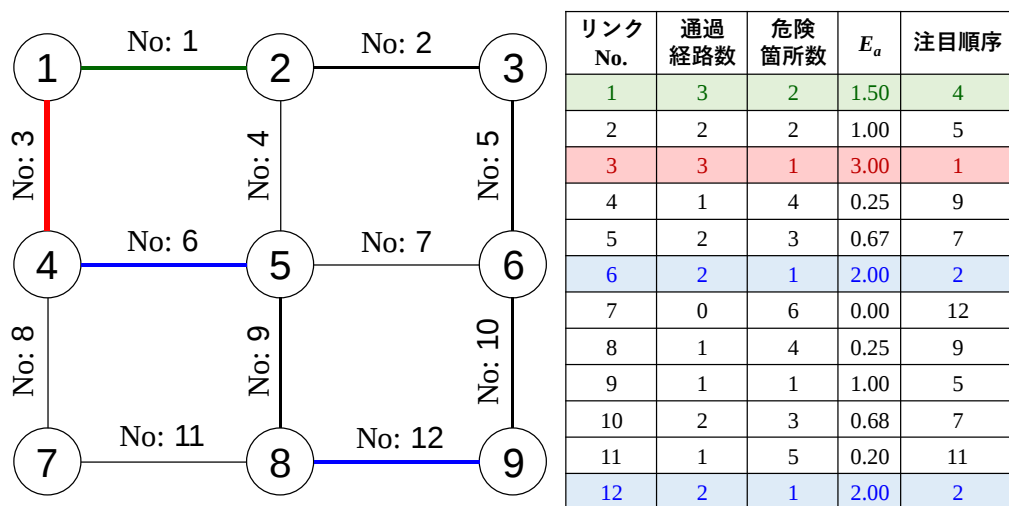


図-3.6 単純仮想ネットワークにおける災害リスク評価結果その2（対策注目度）.

3.4 災害リスク評価手法と災害対応の実施可能性との関係性

道路ネットワークは人や物資の移動を伴う各種災害対応を支える基盤施設であり、災害時にこれら対応が実施可能な状態である（機能を持つ）ことが求められる。これより、道路防災対策は、道路ネットワークの機能向上に加えて災害対応の実施可能性を向上させることもその目的に含むと解釈できる。災害対応の実施可能性には対応実施の確実性と対応の迅速性（円滑性）の2要素が挙げられる。前者は拠点間の接続性の良し悪しに、後者は拠点間の速達性の良し悪しに着目している。2つの要素間に優劣の関係性はなく、いずれを重視するかは対策方針次第である。すなわち、いずれを重視するかによって適切な評価手法が選択される必要がある。

前節で構築した手法は道路ネットワークの接続性向上が対策方針であり、対応実施の確実性に着目した手法である。第1章に述べたように、適用可能な対策方針の幅を拡げることも「手法の深度化」に寄与すると考えられることから、対応の迅速性に着目した対策方針をとろうとした場合に適用可能な評価手法を構築することは十分意義深いと考えられる。そこで、前節で構築した手法を基礎手法として、これを基に対応の迅速性に着目した場合の災害リスク評価手法を構築する。ここで、対応実施の確実性と対応の迅速性に対応する災害リスク評価手法中の要素を表-3.3のように定義する。この定義を踏まえ、対応の迅速性に着目した評価手法構築のために距離要素の導入方針を検討する。

表-3.3 災害対応の実施可能性と災害リスク評価手法中の要素との対応関係

実施可能性	対応する要素	理由
対応実施の確実性	災害リスク (累積災害危険箇所数)	対応実施の確実性が高い状態は拠点間の接続性が高い状態である。 拠点間の災害リスクが低い場合は拠点間の接続性が高いと考えられるため。
対応の迅速性	経路距離 (リンク距離)	対応の迅速性が高い状態は拠点が短い距離で接続されている場合である。 拠点間の距離の長短を測る指標は経路距離であるため。

3.5 距離要素の導入方針の検討

距離要素の導入には2つのアプローチが考えられる。1点目は評価指標に距離を組み込む方法であり、2点目は一定の距離水準を満足する制約を付す方法である。本節では手法の構築に先立って、前節で構築した手法へ距離要素を導入するために適したアプローチを検討する。

3.5.1 アプローチ1：評価指標への距離要素の導入に関する検討

(1) 道路防災対策上の位置づけの整理と評価指標の構築方法の検討

評価指標の役割は、指標に盛り込まれた要素の視点で観た際に最も条件が良いものを抽出することにある。すなわち、このアプローチに対する道路防災対策上の位置づけとは、災害対応実施の確実性と災害対応の迅速性の双方の視点をいいとこ取りした経路を抽出することである。ここで、拠点ペア間の経路を評価する過程で参照されるのが各リンクの移動コストであることを踏まえると、本アプローチは、リンクの災害危険箇所数とリンク距離を統合した新コスト（評価指標）を定義する問題に置き換えられる。

意味の異なる変数を統合する方法としては、①何らかの変換を通して同じ意味を持つ値に変換する方法や、②変数を1つに統合して新たな意味を持つ値を生み出す方法が考えられる。これらの例には、前者には費用便益分析が、後者にはアクセシビリティが挙げられる。費用便益分析では走行時間の短縮や交通事故率の減少といった異なる意味を持つ値を貨幣換算によって貨幣価値という同じ意味を持つ値に変換する。一方、アクセシビリティではサービス水準と旅行時間を統合してサービスへの近接性という新たな意味の値を生み出している。

以上のような方法で、評価指標としての良し悪しの議論は別として、数理構造自体は問題のない新コストを定義できる。ここでは新コストの定義方法として、①相対値への変換による無次元化と平均化、②「乗算による変数統合」と「アクセシビリティ指標の援用」の2つの方向性で検討する。具体的には、新コストの構築方法を検討するとともに、第4章で行うケーススタディと同様の条件を用いて石川県緊急輸送道路ネットワークに適用する。その結果から、目的とした災害対応実施の確実性と災害対応の迅速性双方の視点でのいいとこ取りが達成されているかを検証し、新コストの定義方法としての適用可能性を検証する。

(2) 相対値への変換による無次元化と平均化のアプローチでの新コストの構築方法

リンクの災害危険箇所数とリンク距離は道路ネットワークの特徴量というカテゴリでは「移動コスト」という共通点がある。そこで、ネットワーク内での相対コストへの変換という位置づけで、両変数を対象ネットワークにおける最大値で除して無次元化する（式(3.4)および式(3.5)）。次に、両者を平均化してリンクの平均コストという位置付けを持つ新コストを定義する。なお、平均化には算術平均・幾何平均・調和平均の3手法があるが、いずれが適しているかの判断は困難であるため、ここでは全てについて試行する。これら3つの平均化手法により、式(3.6)～式(3.8)のように新コストを定義する。

$$r_{w,a} = \frac{n_{w,a}}{n_{w,max}} \quad (3.4)$$

ここで、

$r_{w,a}$: リンク a の危険箇所数に関する相対コスト, $n_{w,a}$: リンク a の災害危険箇所数

$n_{w,max}$: 危険箇所数の最大値

$$r_{d,a} = \frac{d_a}{d_{max}} \quad (3.5)$$

ここで、

$r_{d,a}$: リンク a のリンク距離に関する相対コスト, d_a : リンク a のリンク距離

d_{max} : リンク距離の最大値

$$c_a^{P1} = \frac{1}{2}(r_{w,a} + r_{d,a}) \quad (3.6)$$

$$c_a^{P2} = \sqrt{r_{w,a} + r_{d,a}} \quad (3.7)$$

$$c_a^{P3} = \frac{2}{\frac{1}{r_{w,a}} + \frac{1}{r_{d,a}}} \quad (3.8)$$

ここで、

c_a^{P1} : 算術平均法によるリンク a の新コスト, c_a^{P2} : 幾何平均法によるリンク a の新コスト,

c_a^{P3} : 調和平均法によるリンク a の新コスト,

※添字 P は新コストの定義パターンを意味する P であり、右側の数値はパターン番号を示す。

(3) 乗算による変数統合のアプローチでの新コストの構築方法

異なる単位の変数を乗算すること自体に問題はない。そこで、災害危険箇所数とリンク距離の乗算による新コストを定義する。ここで、要件定義次第では災害危険箇所数が 0 となるリンクが生じる。この場合、新コストが 0 に設定されてしまう問題が生じる。そこで、災害危険箇所数には十分に小さい基準項をつけ、新コストを式(3.9)のように定義した。本新コストは「同じ災害危険箇所数であれば距離が長い方がコストは大きい」、「同じ距離であれば災害危険箇所数が多い方がコストは大きい」という対策上の考えのもとで活用されることを想定している。

$$c_a^{P4} = (n_{w,a} + n_{w,ini}) \times d_a \quad (3.9)$$

ここで、

c_a^{P4} : 乗算によるリンク a の新コスト, $n_{w,a}$: リンク a の災害危険箇所数,

$n_{w,ini}$: 災害危険箇所数の基準項 (十分に小), d_a : リンク a のリンク距離

(4) アクセシビリティ指標の援用による新コストの構築方法

アクセシビリティ指標を援用して、あるリンクの起点ノードから終点ノードまでの近接性を評価し、それを当該リンクの新コストとすることを考える。具体的には交通抵抗にリンク距離を、サービス機会にリンクの災害危険箇所数の逆数を設定する。これにより、新コストは「ノード間の災害リスクを加味した近接性」と位置づけられる。アクセシビリティ指標は一般に 3 種類の交通抵抗関数が用いられている⁸⁾が、いずれが適しているか判断が困難なため、ここでは全ての関数を対象に式(3.10)～式(3.12)のように新コストを定義する。アクセシビリティが高い状態は通常望ましい状態であるため、コストへ置き換えるために逆数をとっている。

まず、上記方法でのアクセシビリティ指標の援用の妥当性を検討する。アクセシビリティ指標の 2 つの要素のうち交通抵抗はリンク距離から定義するため、本来の定義との差異はない。もう 1 方のノードのサービス機会をリンクの災害危険箇所数で設定することの妥当性を、アクセシビリティ指標に関する研究事例やノードのサービス機会がノードの魅力度とも表現されること^{例えば 9)}をもとに検討する。アクセシビリティ指標を活用した研究を見ると、病院施設を対象として病床数を適用した事例^{9),10)}や商業施設を対象として床面積や売り場面積を適用した事例^{9),11)}があるなど、サービス機会はある一定の妥当性を持つ範囲で自由に設定される余地を持っていると考えられる。また、ノードのサービス機会を災害リスクの視点で観た魅力度として捉えた時、ある起点ノードから見た魅力度の高い終点ノードとは、到達までに遭遇する災害リスクが少ないノードである。この災害リスクはリンクの災害危険箇所数で表現できる。以上より、サービス機会に災害危険箇所数の逆数を設定することは一定の妥当性を持つものとする。

$$c_a^{P5} = \frac{1}{c_a^{P5'}}, \quad c_a^{P5'} = \frac{1}{n_{w,a}} d_a^\gamma \quad (3.10)$$

$$c_a^{P6} = \frac{1}{c_a^{P6'}}, \quad c_a^{P6'} = \frac{1}{n_{w,a}} \exp(-\beta d_a) \quad (3.11)$$

$$c_a^{P7} = \frac{1}{c_a^{P7'}}, \quad c_a^{P7'} = \frac{1}{n_{w,a}} d_a^\gamma \exp(-\beta d_a) \quad (3.12)$$

ここで、

c_a^{P5} ：べき乗関数型交通抵抗関数を用いたアクセシビリティ指標によるリンク a の新コスト、

c_a^{P6} ：指数関数型交通抵抗関数を用いたアクセシビリティ指標によるリンク a の新コスト、

c_a^{P7} ：べき乗関数・指数関数混合型交通抵抗関数を用いたアクセシビリティ指標によるリンク a の新コスト、

γ, β ：パラメータ（ここでは便宜的に 0.5 に設定）、 $n_{w,a}$ ：リンク a の災害危険箇所数、

d_a ：リンク a のリンク距離

(5) 石川県緊急輸送道路ネットワークを対象とした各新コストの適用可能性の検討

構築した7つの新コスト（式(3.6)～式(3.12)）について、目的とした災害対応実施の確実性と災害対応の迅速性のいいとこ取りが達成されているかを検証し、新コストの適用可能性を分析する。具体的には、リンクのコストを各新コストに置き換える以外は第4章のケーススタディと同様の条件設定下で経路評価を行い、抽出された経路の累積災害危険箇所数と経路距離を比較する。ここで、分析のケース名及びその詳細は

表-3.4に示す通りである。また、経路の特性が異なることを踏まえて、第1経路と第2経路に分けて以下の視点で適用可能性を検証する。

まず、第1経路に関する視点を整理する。比較ケースは経路距離を改善することを目的とするため、「経路距離が減少していること」を目的達成の判断条件とする。

次に、第2経路に関する視点を整理する。第2経路を構成するリンクは、第1経路とは重複しない。これを踏まえると、第1経路で目的通りに「基準ケースに比べて累積災害危険箇所数は増加するが経路距離は短くなる経路」が抽出された場合、第2経路では「基準ケースに比べて累積災害危険箇所数が減少するが経路距離は長くなる経路」が抽出される可能性が高い。このため、「全体的な傾向として累積災害危険箇所数が減少し、経路距離が増加していること」を目的達成の判断条件として想定する。

表-3.5から表-3.8に第1、第2各経路における累積災害危険箇所数と経路距離に関する基準ケースとの比較表を示す。なお、これら表における項目の詳細は以下に示す通りである。

【基礎比較表（表-3.5から表-3.8）における集計項目の解説】

※ここでは便宜的に累積災害危険箇所数と経路距離を総称して経路の特微量と表現

- i) 変化無しペア率：経路の特微量が基準ケースから変化しなかった拠点ペアの割合
- ii) 増加ペア率：経路の特微量が基準ケースから増加した拠点ペアの割合
- iii) 減少ペア率：経路の特微量が基準ケースから減少した拠点ペアの割合
- iv) 平均増加率：経路の特微量が増加した拠点ペアにおける特微量の増加率の平均値
- v) 増加率標準偏差：増加率の標準偏差
- vi) 平均減少率：経路の特微量が減少した拠点ペアにおける特微量の減少率の平均値
- vii) 減少率標準偏差：減少率の標準偏差

表-3.4 ケース設定一覧表

ケース名	ケース詳細
基準ケース	リンクコストを災害危険箇所数のみで定義したケース ※簡単のために災害危険箇所数は整数値に変更
比較ケース 1	算術平均法による新コスト(式(3.6))を適用したケース
比較ケース 2	幾何平均法による新コスト(式(3.7))を適用したケース
比較ケース 3	調和平均法による新コスト(式(3.8))を適用したケース
比較ケース 4	乗算による新コスト(式(3.9))を適用したケース
比較ケース 5	アクセシビリティ指標(べき乗関数型)による新コスト(式(3.10))を適用したケース
比較ケース 6	アクセシビリティ指標(指数関数型)による新コスト(式(3.11))を適用したケース
比較ケース 7	アクセシビリティ指標(べき乗関数・指数関数混合型)による新コスト(式(3.12))を適用したケース

表-3.5 第 1 経路の累積災害危険箇所数に関する基準ケースとの基礎比較表

累積通過 災害危険箇所	比較 ケース 1	比較 ケース 2	比較 ケース 3	比較 ケース 4	比較 ケース 5	比較 ケース 6	比較 ケース 7
変化無しペア率	33.7%	64.9%	90.6%	37.9%	44.7%	30.3%	52.5%
増加ペア率	66.3%	35.1%	9.4%	62.1%	55.3%	69.7%	47.5%
減少ペア率	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
平均増加率	25.1%	11.0%	15.1%	23.9%	10.9%	52.1%	43.4%
増加率標準偏差	0.226	0.095	0.092	0.167	0.089	0.322	0.293
平均減少率	-	-	-	-	-	-	-
減少率標準偏差	-	-	-	-	-	-	-

表-3.6 第 1 経路の経路距離に関する基準ケースとの基礎比較表

経路距離	比較 ケース 1	比較 ケース 2	比較 ケース 3	比較 ケース 4	比較 ケース 5	比較 ケース 6	比較 ケース 7
変化無しペア率	8.7%	10.0%	11.7%	12.3%	4.4%	4.4%	12.7%
増加ペア率	0.0%	29.9%	55.6%	76.2%	51.3%	51.3%	44.0%
減少ペア率	91.3%	60.1%	32.7%	11.5%	44.3%	44.3%	43.4%
平均増加率	-	6.1%	7.3%	16.1%	14.5%	14.5%	11.6%
増加率標準偏差	-	0.154	0.185	0.392	0.253	0.253	0.351

平均減少率	-15.1%	-7.7%	-6.5%	-3.4%	-8.0%	-8.0%	-9.4%
減少率標準偏差	0.111	0.095	0.099	0.062	0.100	0.100	0.095

表-3.7 第2経路の累積災害危険箇所数に関する基準ケースとの基礎比較表

累積通過 災害危険箇所数	比較 ケース 1	比較 ケース 2	比較 ケース 3	比較 ケース 4	比較 ケース 5	比較 ケース 6	比較 ケース 7
変化無しペア率	21.7%	46.9%	45.2%	21.2%	39.0%	28.1%	40.0%
増加ペア率	55.9%	31.5%	46.7%	51.8%	56.4%	30.2%	44.4%
減少ペア率	22.4%	21.5%	8.1%	27.1%	4.6%	41.7%	15.6%
平均増加率	21.4%	19.6%	22.8%	23.6%	19.8%	24.4%	27.7%
増加率標準偏差	0.247	0.418	0.538	0.220	0.453	0.221	0.236
平均減少率	-26.8%	-26.2%	-24.4%	-23.9%	-21.8%	-29.7%	-32.4%
減少率標準偏差	0.160	0.157	0.196	0.149	0.176	0.192	0.191

表-3.8 第2経路の経路距離に関する基準ケースとの基礎比較表

経路距離	比較 ケース 1	比較 ケース 2	比較 ケース 3	比較 ケース 4	比較 ケース 5	比較 ケース 6	比較 ケース 7
変化無しペア率	5.0%	7.1%	9.4%	6.9%	3.2%	3.2%	3.1%
増加ペア率	28.5%	47.4%	53.0%	79.8%	41.9%	41.9%	72.2%
減少ペア率	66.5%	45.5%	37.6%	13.3%	54.9%	54.9%	24.7%
平均増加率	8.7%	14.8%	16.0%	21.6%	23.4%	23.4%	28.4%
増加率標準偏差	0.127	0.269	0.380	0.674	0.389	0.389	0.538
平均減少率	-11.4%	-9.3%	-7.0%	-13.4%	-9.4%	-9.4%	-10.7%
減少率標準偏差	0.127	0.133	0.123	0.166	0.134	0.134	0.138

まず、第1経路の目的達成条件を確認する。表-3.6から、比較ケース1以外の6ケースでは経路距離が増加したペアの存在が確認され、目的に反する結果となったことが明らかとなった。一方で、比較ケース1では経路距離が増加した拠点ペアは確認されておらず、90%以上の拠点ペアで経路距離が減少し、その平均減少率も15.1%と良好な結果となっている。

次に、比較ケース1に絞って、第2経路の目的達成条件を確認する。上記結果より、第2経路では「累積災害危険箇所数に減少、経路距離に増加の傾向が確認される」ことが予想されたが、表-3.7および表-3.8は真逆の結果を示している。

以上より、増加・減少ペア率および平均増加・減少率は目的に反する結果を示したと判断される。ここで、結果の全体像を把握するため、累積災害危険箇所数と経路距離に関する散布図（図-3.7 から図-3.13）を確認する。

第1経路について、累積災害危険箇所数は全ケースで増加傾向であり、その増加度合いはケースごとに異なる。また、突出して累積災害危険箇所数が増加した拠点ペアはどのケースでも確認されない。一方で、経路距離は増加した拠点ペアと減少した拠点ペアが混在しており、傾向が定まっているとは言えない。また、突出して増加・減少した拠点ペアも散見される。

第2経路はその定義上、第1経路の影響を受けて経路構成が変化するため、第1経路に比べてばらつきが大きくなることや、累積災害危険箇所数が基準ケースよりも減少する拠点ペアが生じること自体は自然である。そもそも、第2経路の役割が冗長性の確保であることを踏まえれば、第1経路が目的通りに抽出されている場合には、基準ケースに比して明らかな悪化が見られない限りは問題視する必要はないとも考えられる。一方で、第1経路の累積災害危険箇所数・経路距離が基準ケースより増加したにも関わらず、第2経路でも累積災害危険箇所数・経路距離が増加した拠点ペアがどのケースでも多数存在することは、当初の目的に反する望ましくない結果である。これは、災害対応実施の確実性と災害対応の迅速性双方の視点を取り入れるという目的を達成できなかったことにほかならない。

新コストの構築方法そのものには大いに変更・改良の余地がある。一方で、以上の結果からは、評価指標に距離の要素を導入することで、災害対応実施の確実性と災害対応の迅速性双方のいいとこ取りを実現するアプローチには困難が伴うと結論付けられる。

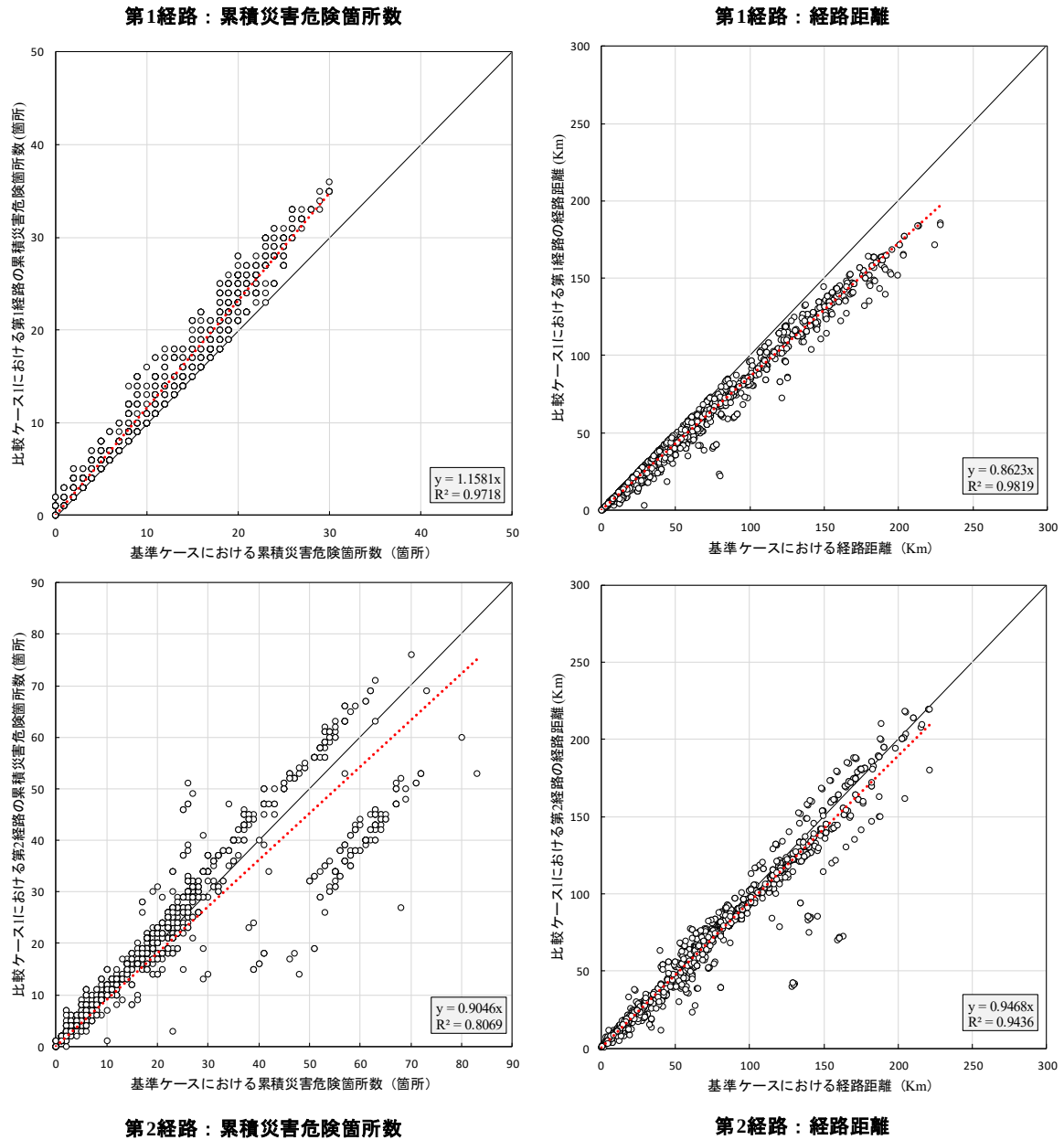


図-3.7 比較ケース1と基準ケースの累積災害危険箇所数と経路距離に関する散布図

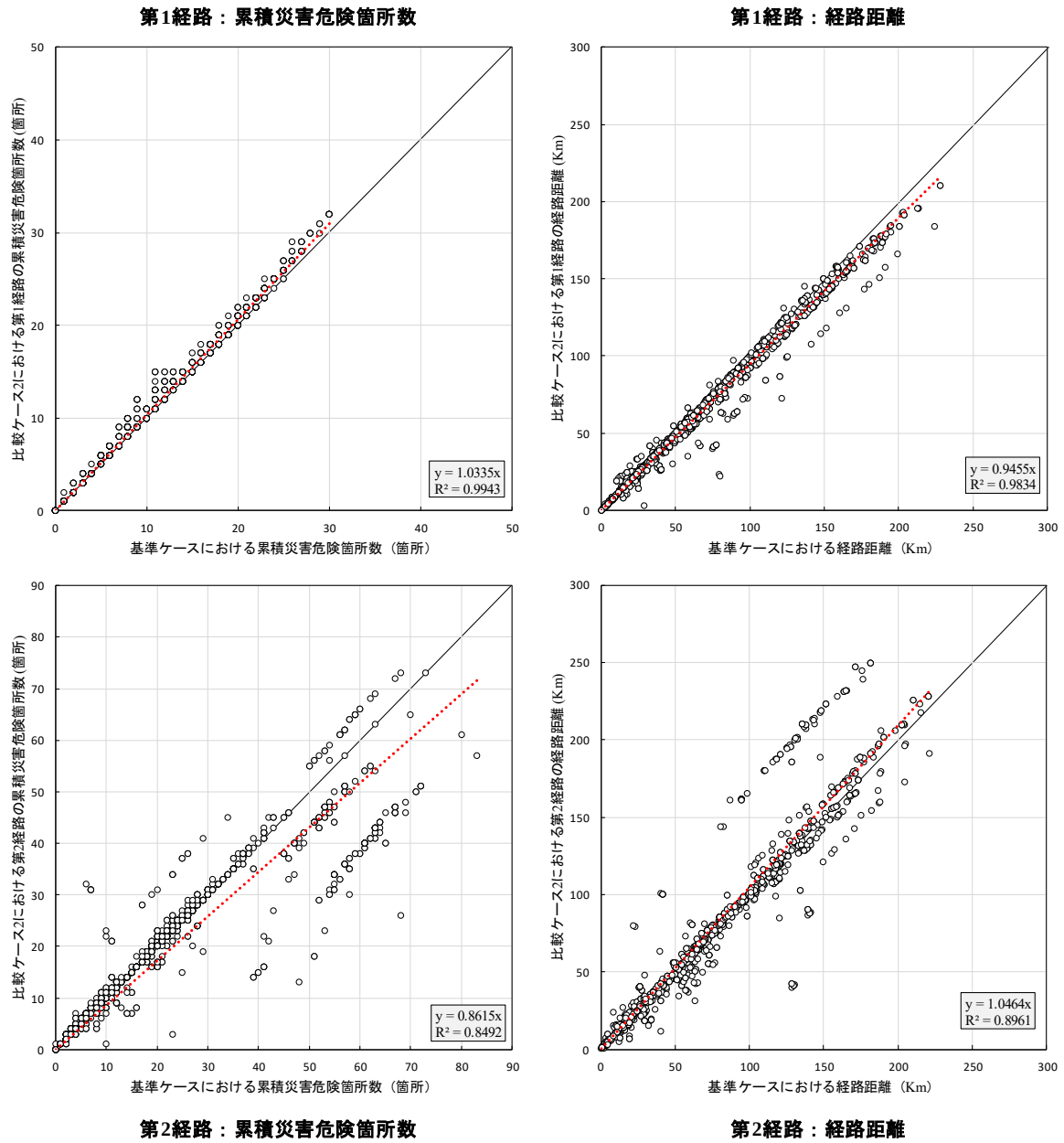


図-3.8 比較ケース2と基準ケースの累積災害危険箇所数と経路距離に関する散布図

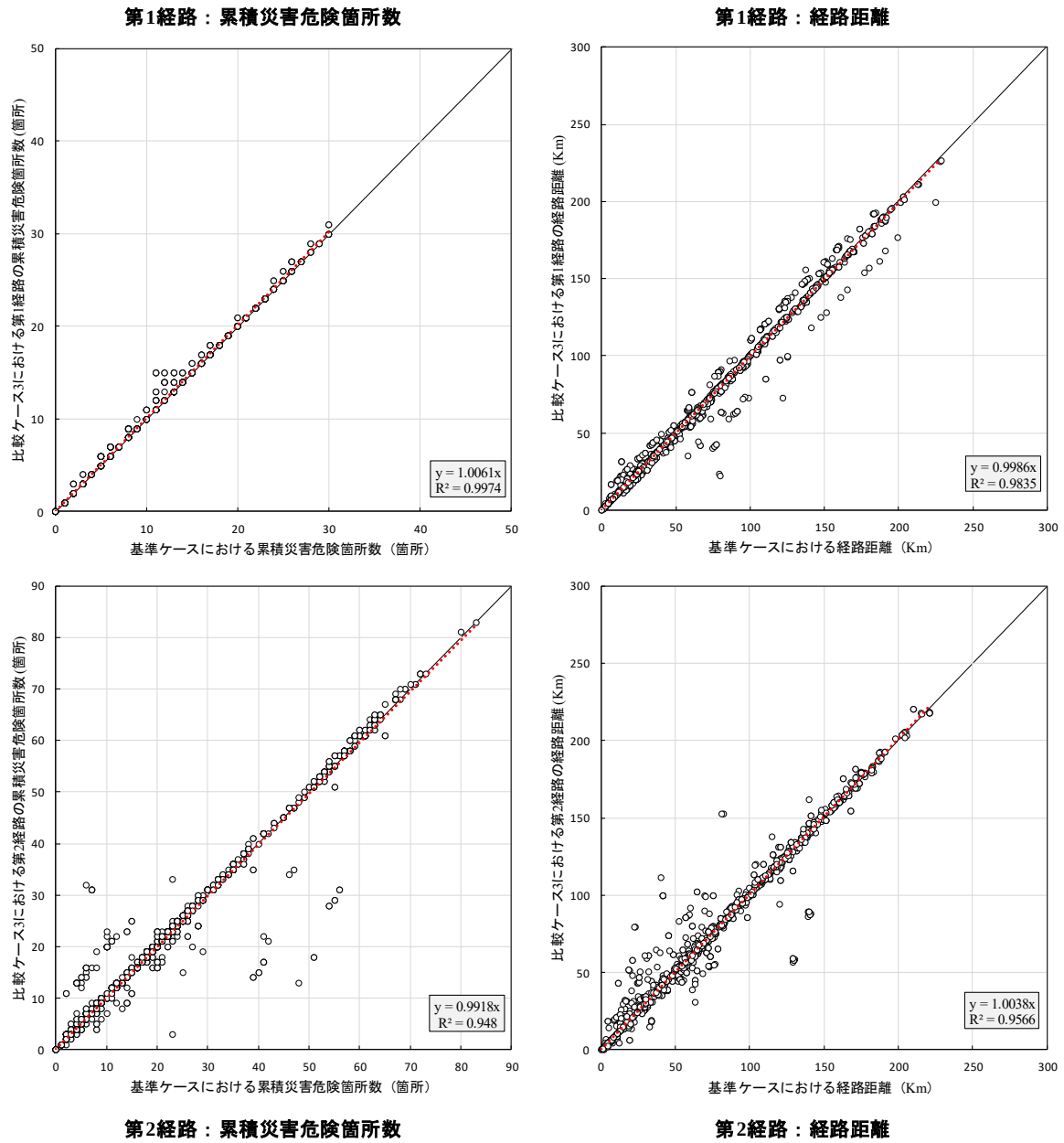


図-3.9 比較ケース3と基準ケースの累積災害危険箇所数と経路距離に関する散布図

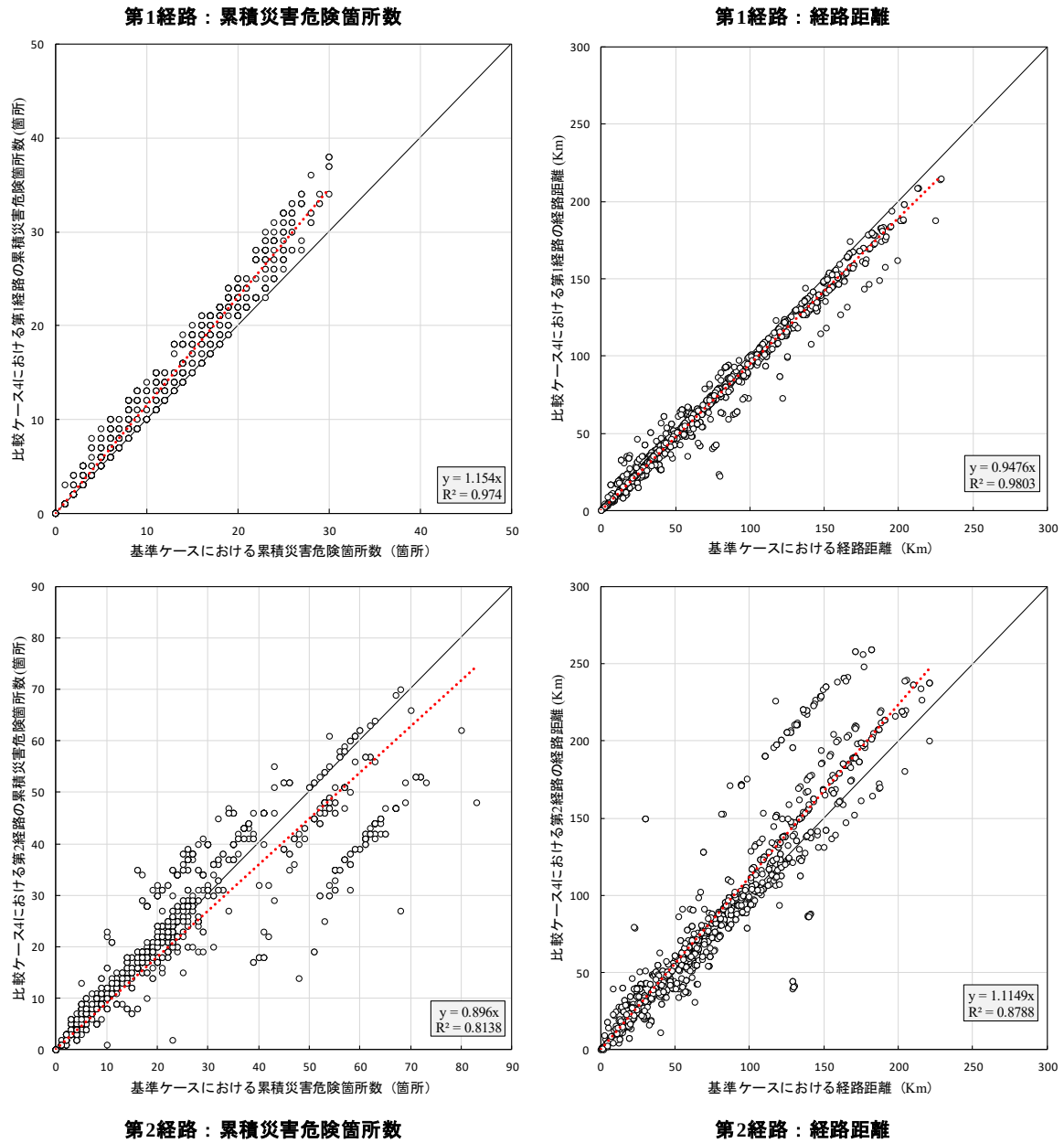


図-3.10 比較ケース4と基準ケースの累積災害危険箇所数と経路距離に関する散布図

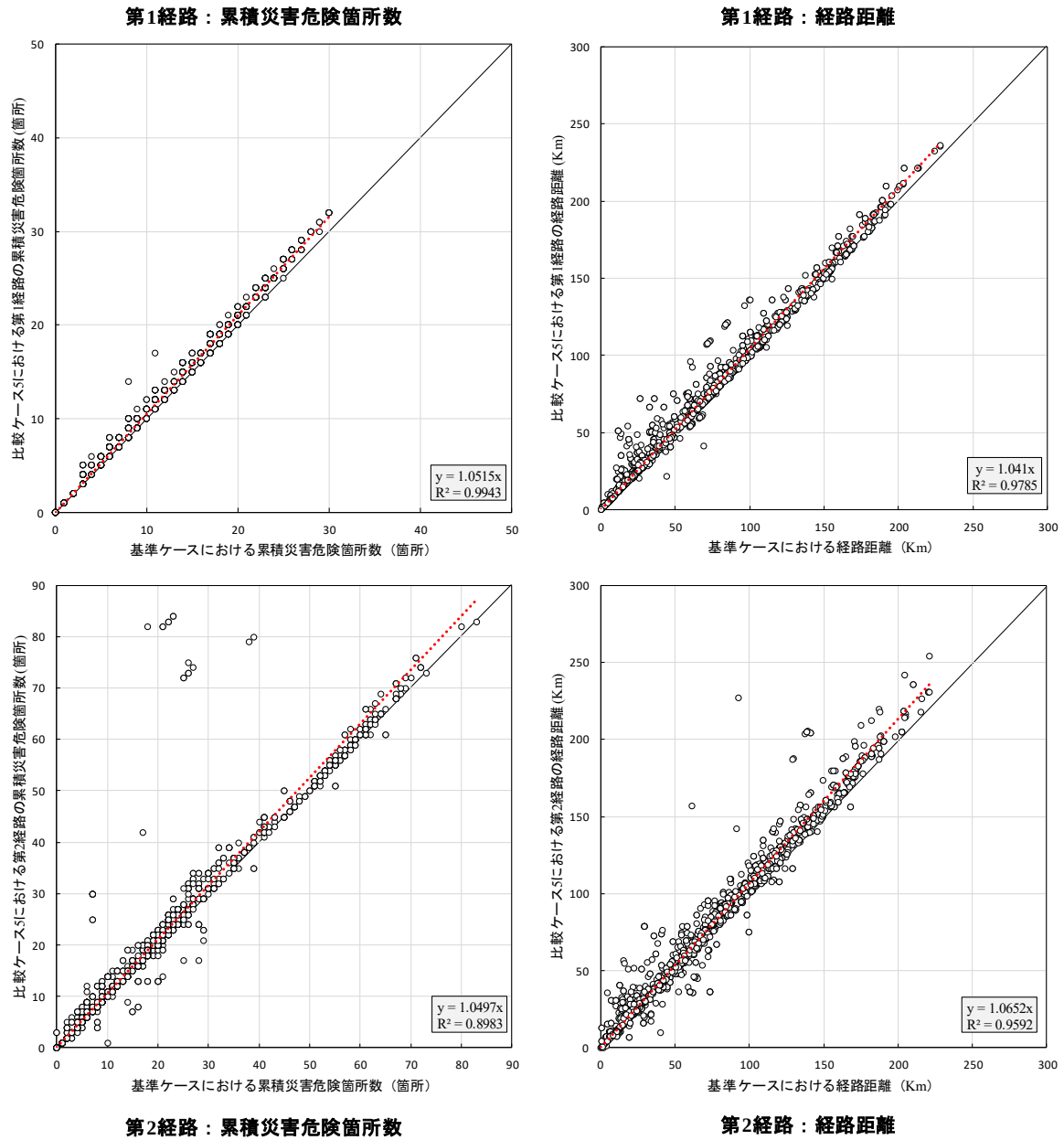


図-3.11 比較ケース5と基準ケースの累積災害危険箇所数と経路距離に関する散布図

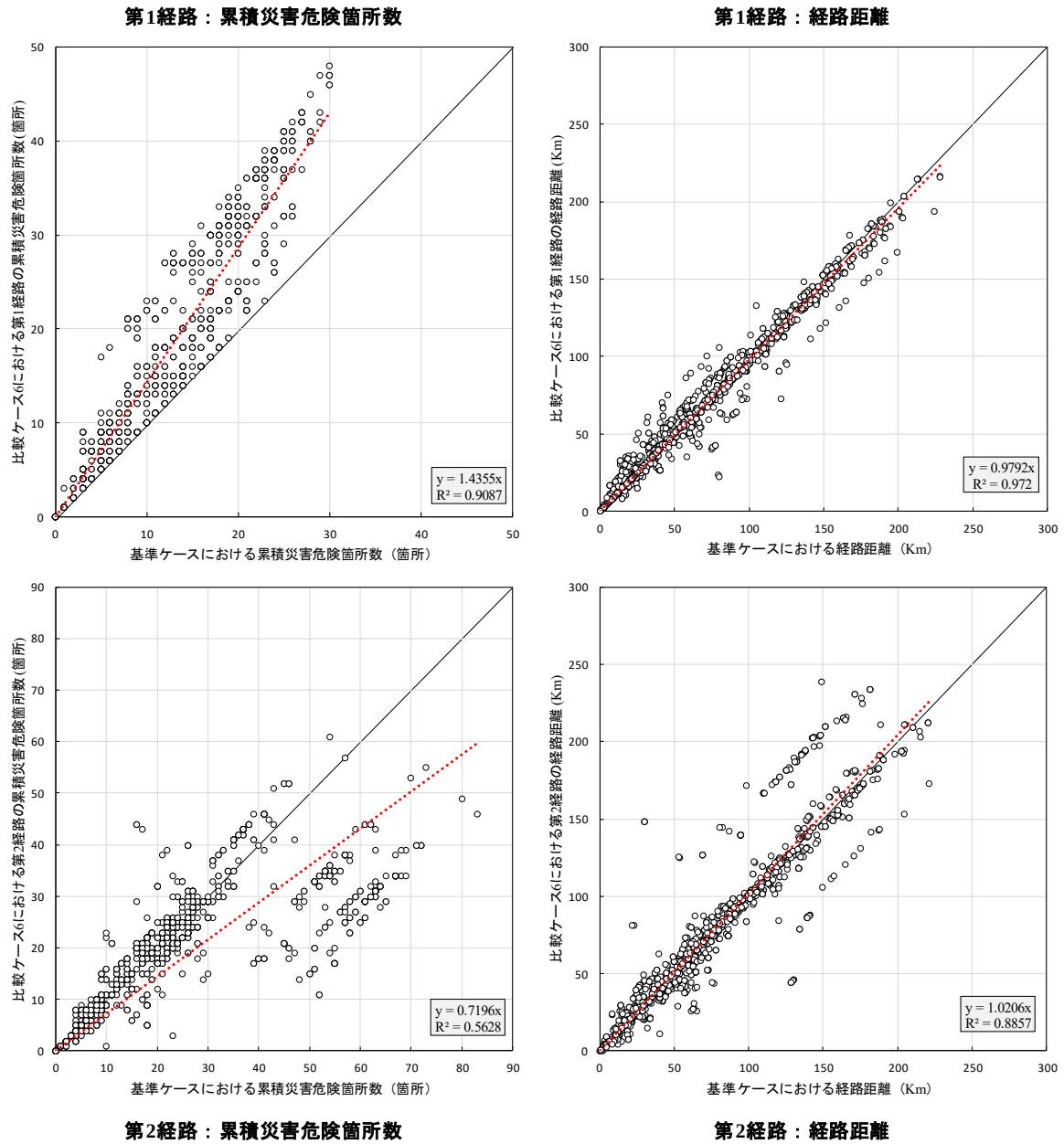


図-3.12 比較ケース6と基準ケースの累積災害危険箇所数と経路距離に関する散布図

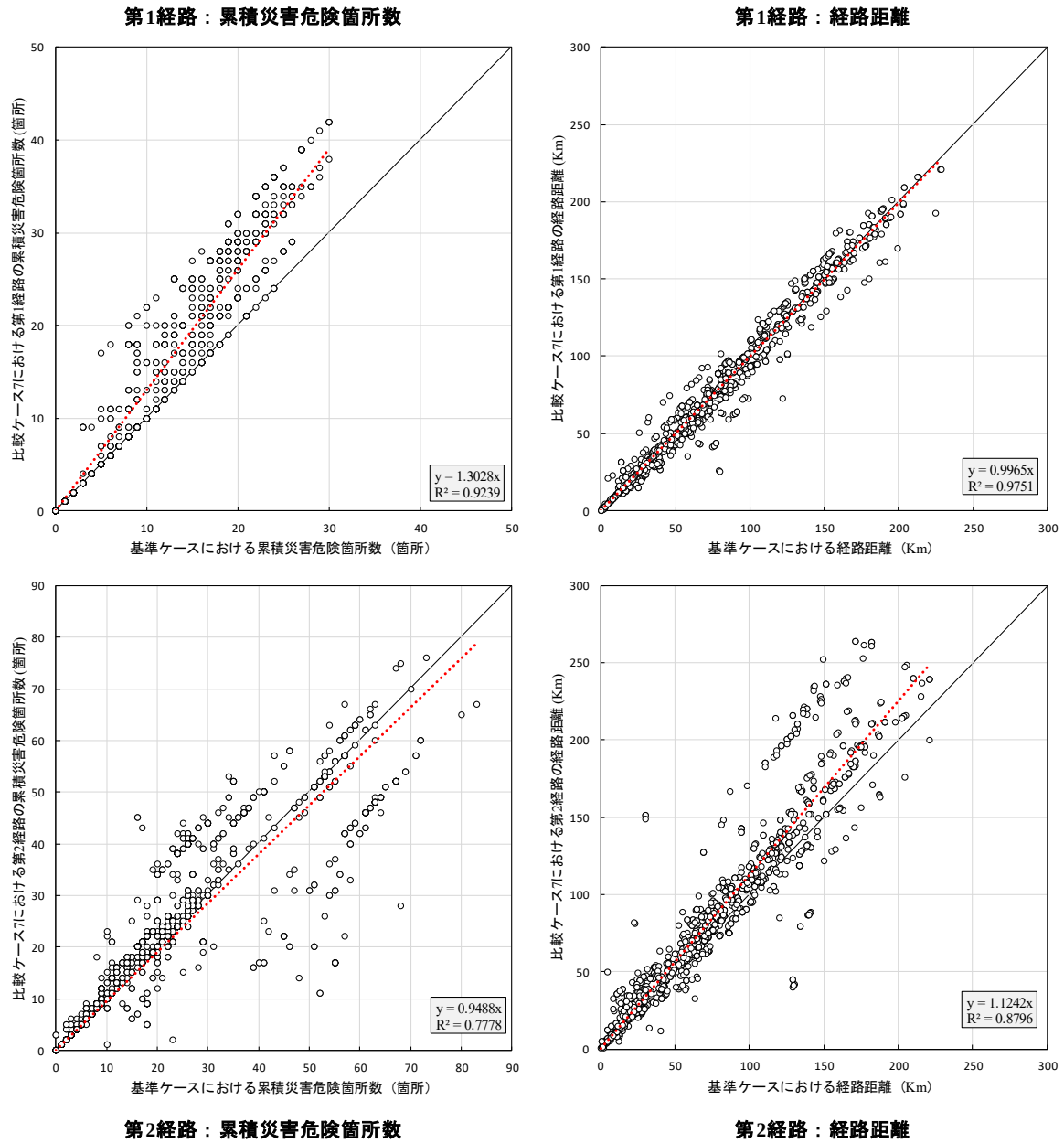


図-3.13 比較ケース7と基準ケースの累積災害危険箇所数と経路距離に関する散布図

3.5.2 アプローチ2：一定の距離水準を満足する制約の付加に関する検討

前項での迅速性を最大限向上させる方針以外に、一定水準の迅速性確保を目指す方針も考えられる。対応の迅速性が高い状態は拠点間が短い距離の経路で接続された状態である。すなわち、距離水準の制約を満足するように拠点ペア間の経路を抽出することで、上記の考え方が実現される。そこで、距離制約を付した経路評価の方法を検討する。

距離制約を付した経路評価の概念図を図-3.14に示す。災害危険箇所数を移動コストとみなして経路評価を行なうところまでは前節で構築した手法と同様である。ここでは許容可能距離（距離水準）を導入して経路の採否を判断する過程を追加する。採否判断の手順は次の通りである。抽出した経路が棄却された場合、次に累積災害危険箇所数の少ない別の経路を探索し、再度同様に経路の採否を判断する。以降は経路が採用されるまでこの過程を繰り返す。図-3.14の例では、第1～第3最小累積危険箇所数経路は許容可能距離を満足しないために棄却され、第4最小累積危険箇所数経路ではじめて許容可能距離が満足されるため、これが対策候補経路に採用される。このように、累積災害危険箇所数の昇順に経路をチェックすることで一定水準の迅速性を確保しつつ、その中で最も災害リスクが低い経路を対策候補として抽出できる。ここで、許容可能距離をその拠点ペア間の最短距離未満に設定しない限りは条件を満足する経路は必ず存在する。したがって、以上の方法は経路評価のアルゴリズムの工夫で実現可能である。

以上より、本研究では距離制約を付した経路評価のアプローチによって、災害対応の迅速性にも着目した災害リスク評価手法を構築する。

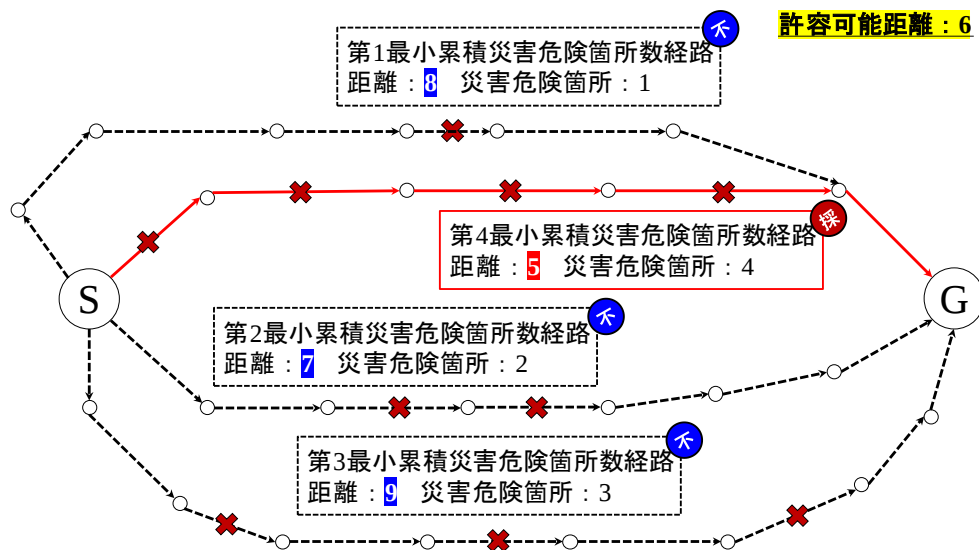


図-3.14 距離制約を付した経路評価による対策候補経路の抽出 概念図

3.6 k 番目経路探索の援用による経路距離を考慮した災害危険箇所数を指標とした道路の災害リスク評価手法のフレームワーク

本節では距離制約を付した経路評価によって、災害対応の迅速性の視点を導入した災害リスク評価手法を構築する。具体的には、最短経路探索の拡張概念であり、2番目の最短経路、3番目の最短経路……というように、 k 番目の最短経路を求める問題である k 番目経路探索の手法を援用する。本節ではまず k 番目経路探索の援用に対する災害リスク評価手法としての考え方・位置付けを整理する。次に具体的な評価方法と評価フローの提示、単純仮想ネットワークへの適用という順で構築した手法のフレームワークを解説する。

3.6.1 災害リスク評価手法としての基本的な考え方

道路防災対策の方針自体は「共通するリスクへの対策による道路ネットワークの接続性の向上」から不変である。ただし、一定の距離水準を満足する経路のみを対策候補経路として抽出することで、基本手法を適用した場合とは対策候補経路の共通区間が異なる。また、距離水準を満足するために、基本手法に比べて累積災害危険箇所数が多い経路が対策候補に選定される拠点ペアが一定数出現する。したがって、対策が必要な箇所は基本手法を適用した場合に比べて確実に増大する。これより、災害対応の迅速性を確保するために、多くの箇所への対策が必要になることを認識した上で活用されることを想定した手法として提案する。

3.6.2 災害リスクの評価方法と評価フロー

(1) 評価フローの全体像

前項に述べた基本的な考え方に沿い、具体的な災害リスクの評価方法とそのフローを述べる。

災害リスクの評価は、①災害リスク評価の条件設定、②各リンクの災害危険箇所の該当判定、③各リンクの災害危険箇所数の集計、④災害危険箇所数と許容可能距離に基づく各拠点ペアの経路評価、⑤各リンクの対策注目度の算出という大きく5つのフローから構成される(図-3.15)。

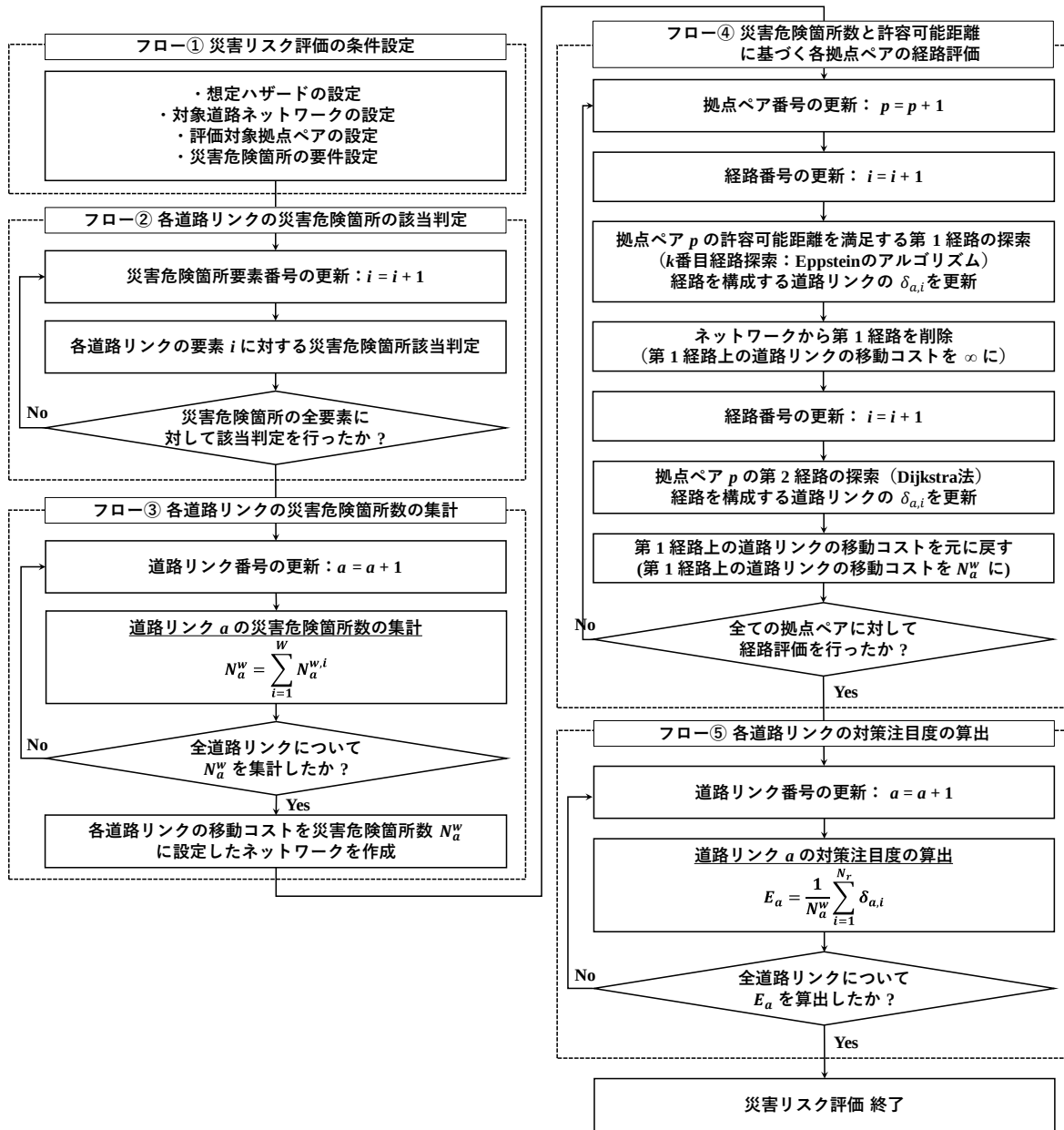


図-3.15 経路距離を考慮した災害危険箇所数を指標とする災害リスク評価のフロー図

(2) 災害危険箇所数と許容可能距離に基づく各拠点ペアの経路評価

経路評価の基本的な考え方は、第 2 経路まで含めて 3.3.2(4)と同様である。基本的には各リンクの災害危険箇所数を移動コストとした経路探索を行う。ただし、災害対応の迅速性の視点付加という目的に対応して、第 1 経路に対してのみ、許容可能距離の制約を設けて経路を評価する。具体的には、 k 番目経路探索によって k 番目最小累積災害危険箇所数経路（以下、最短経路）を導出し、許容可能距離を満足するとき経路に採用し、満足しないときは $k+1$ 番目最短

経路を導出し採否を判断する。これを許容可能距離を満足する経路が導出されるまで繰り返す。第1経路が抽出されたら、3.3.2(4)と同様の方法で第2経路を抽出する。なお、 k 番目経路探索のアルゴリズムとしては Yen¹²⁾や Eppstein¹³⁾のアルゴリズムがある。ここでは経路探索の効率性を踏まえて Eppstein¹³⁾のアルゴリズムを適用する。以上を概念図として図-3.16に整理した。

ここで、第2経路に許容可能距離の制約を付さないことに対する道路防災対策上の考え方および位置付けを整理する。第2経路にも距離の制約を付した場合、基礎手法を適用した場合と比べて、対策が必要な箇所は大きく増加することが想定される。そこで、第2経路の役割である冗長性の確保のみに着目しようという考え方が、ここでの対策上の考え方・位置づけである。なお、本提案手法のフレームワークは、対策の考え方次第で第2経路にも距離の制約を付すことが可能である。この場合、第2経路についても第1経路と同様の手順で許容可能距離と k 番目経路探索のアルゴリズムを適用すれば良い。すなわち、「冗長性確保を目的とした第2経路でも災害対応の迅速性を考慮すべきである」という考え方にも対応可能な手法である。

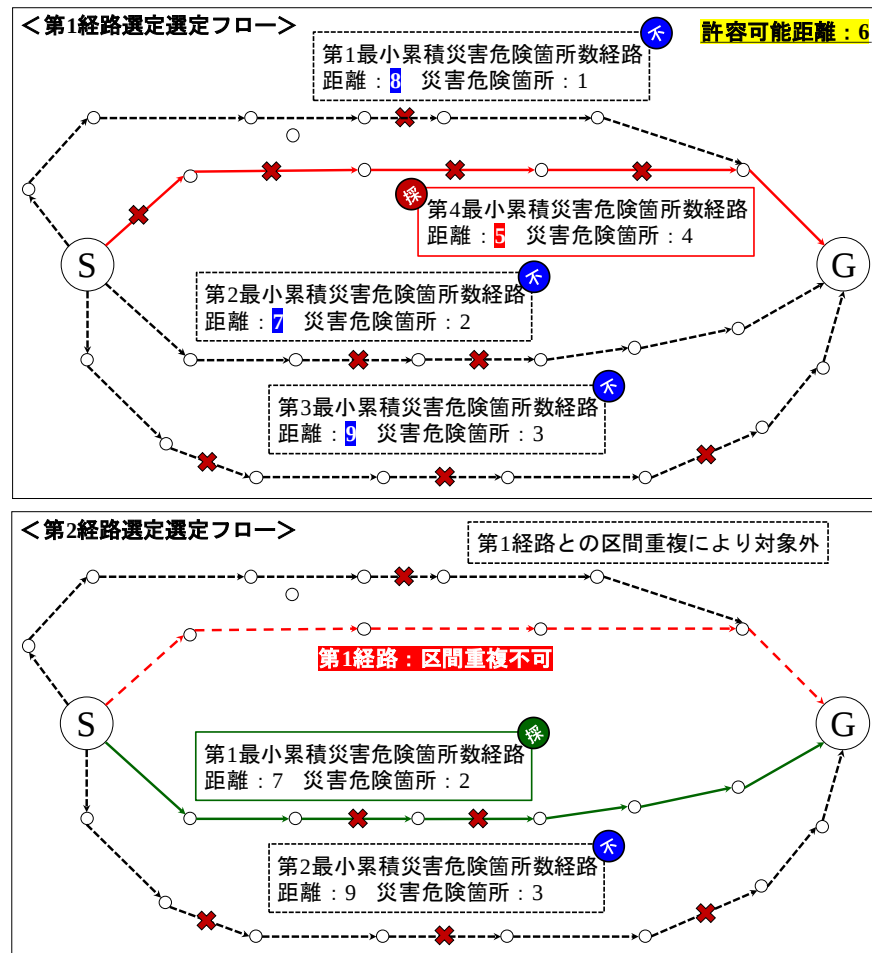


図-3.16 災害危険箇所と許容可能距離に基づく拠点ペアの経路評価 概念図

3.6.3 単純仮想ネットワークへの適用

単純仮想ネットワークへ本提案手法を適用し、本手法による災害リスク評価の平易な事例を示す。具体的には、図-3.17に示すような条件の単純仮想ネットワークに適用する。各リンクのコストは図-3.17中のリンク上に示したボックスの2段目に記載された数値に対応している（左：災害危険箇所数、右：リンク距離）。また、拠点ペア設定は図-3.17中右下の表の通り、全3ペアを設定した。また、許容可能距離は各拠点ペア間の最短経路距離の1.5倍に設定した。

分析結果のうち、各拠点ペアに対する経路評価結果を図-3.18に、各リンクに対する対策注目度の評価結果を図-3.19に示す。本分析でのネットワーク条件に従うと、各リンクの通過経路数および対策注目度は図-3.19中の右表のように整理される。対策注目度はリンク6が最も高く、これにリンク3およびリンク9、リンク1およびリンク12の順に続く。今回の対象拠点ペアは3組であり、第1経路と第2経路とで重複せざるを得ないリンクは生じ得ないネットワーク構造であるため、最大通過経路数は3であるが、ここでは全ての拠点ペアの経路が通過したリンクは存在しなかった。3.3.3項における結果と比較すると、許容可能距離の制約によって3.3.3項における第1経路の全てが経路距離の要求水準を満足しないために経路構成が大きく変化している点に注意されたい。

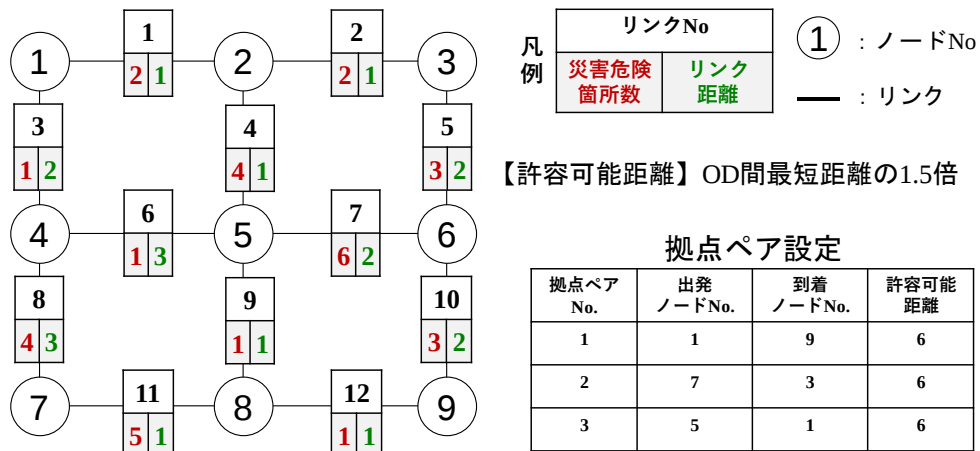


図-3.17 単純仮想ネットワーク図

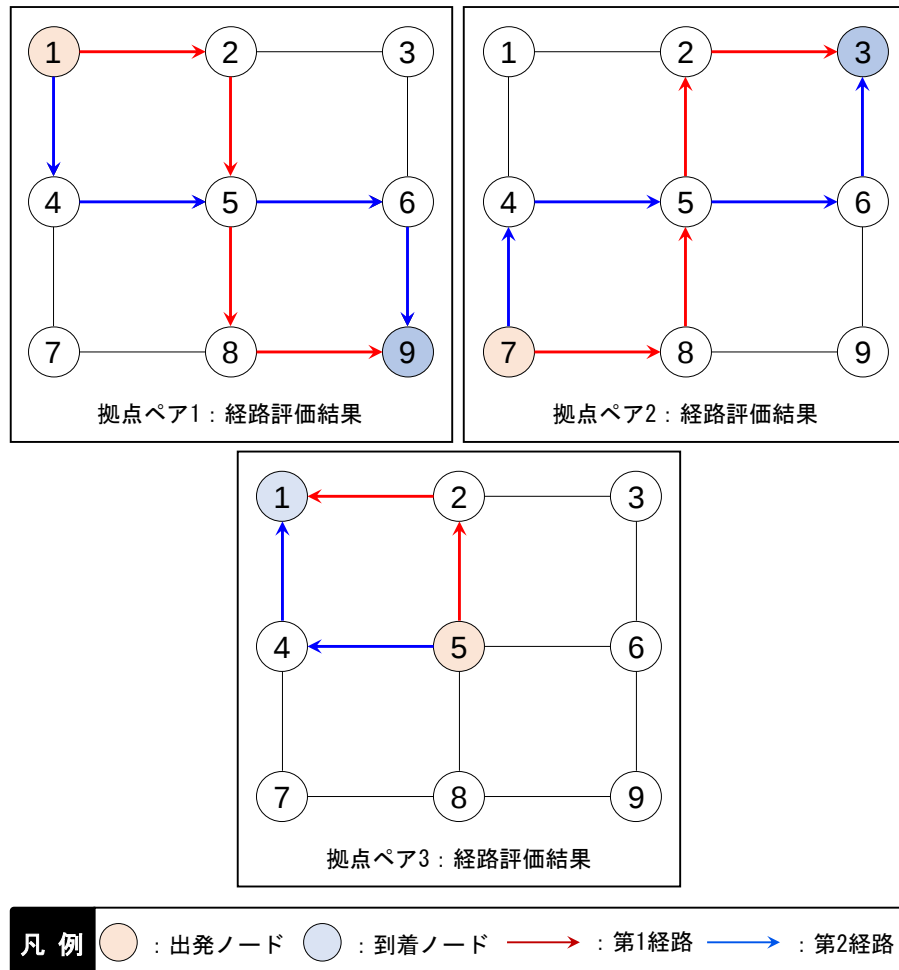


図-3.18 単純仮想ネットワークにおける災害リスク評価結果その1（経路評価）

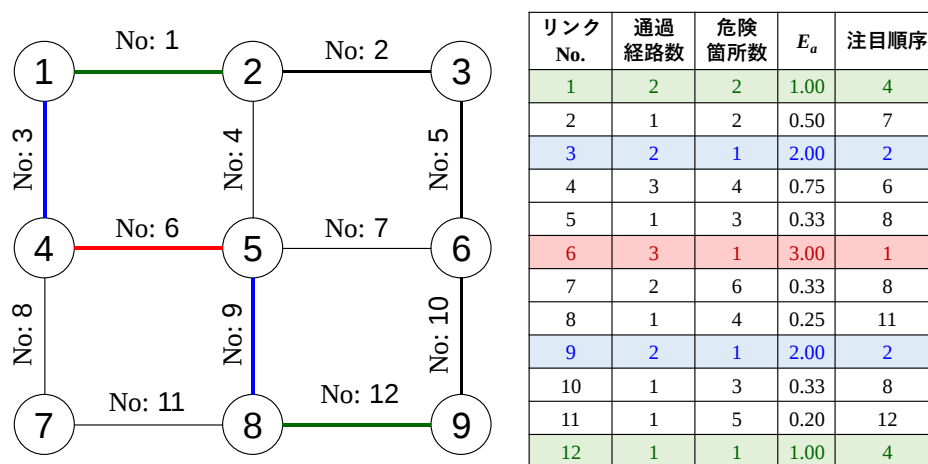


図-3.19 単純仮想ネットワークにおける災害リスク評価結果その2（対策注目度）

3.7 おわりに

本章では第 1 章で示した評価手法の深度化のアプローチを踏まえて、「共通するリスクへの対策による道路ネットワークの接続性向上」を対策方針に掲げた災害危険箇所数を指標とする 2 つの災害リスク評価手法を構築した。1 つは災害対応の実施可能性のうち「対応実施の確実性」に着目した手法であり、もう一方は「対応実施の確実性」に加えて「対応の迅速性」にも着目した手法である。前者の手法（基礎手法）は①災害リスク評価の条件設定、②各リンクの災害危険箇所の該当判定、③各リンクの災害危険箇所数の集計、④災害危険箇所数に基づく各拠点ペアの経路評価、⑤各リンクの対策注目度の算出の 5 つのフローで構成される。後者も同様に 5 つのフローで構成される。ただし、 k 番目経路探索手法を援用して許容可能距離の制約を付加した経路評価によって一定の距離水準が満足された経路を対策候補として抽出するため、4 番目のフローのみ「災害危険箇所数と許容可能距離に基づく各拠点ペアの経路評価」に置き換わる。これら 2 手法をそれぞれ単純仮想ネットワークに適用し、提案手法の挙動確認を行なうとともに、提案手法による評価の全体像を解説した。

第 3 章 参考文献

- 1) 東京都防災ホームページ 南海トラフ巨大地震等による東京の被害想定 第 3 部 被害想定手法, 4.2 各被害の想定手法 : https://www.bousai.metro.tokyo.lg.jp/_res/projects/default_project/_page_/001/000/402/part3-4-2.pdf (2019.12.27 閲覧)
- 2) Ahmed WAHID UDDIN, 大澤脩司, 藤生慎, 高山純一, 中山晶一郎: 緊急輸送道路の災害リスクを考慮した都道府県庁と市町村役場間の到達可能性に関する分析, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.72, No.4, pp.I_756-I_767, 2016.
- 3) 公益社団法人土木学会 地震工学研究委員会: 東日本大震災による橋梁等の被害分析小委員会 最終報告書, 2015.
- 4) 公益社団法人砂防学会, 平成 30 年北海道胆振東部地震土砂災害緊急調査に基づく提言: https://jsece.or.jp/branch/hokkaido/common/media/pdf/20181025tokyo_houkokukai/20181025teigen_pdf.pdf(2019.12.27 閲覧)
- 5) 国土交通省 砂防土砂災害防止法の概要: <http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sabo/linksinpou.html> (2019.12.27 閲覧)
- 6) 南正昭, 高野新栄, 加賀屋誠一, 佐藤馨一: 拠点医療施設へのアクセスを 2 系統で保証する道路ネットワーク構造, 土木計画学研究・論文集, No.14, pp.679-686, 1997.
- 7) 原田剛志, 倉内文孝, 高木朗義: リダンダンシーを考慮したアクセシビリティに基づく道路ネットワークの接続脆弱性評価, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.70, No.1, pp.76-87, 2014.
- 8) 飯田恭敬, 北村隆一: 交通工学, p.87, オーム社, 2008.
- 9) 加知範康, 岑貴志, 加藤博和, 大島茂, 林良嗣: ポテンシャル型アクセシビリティ指標に基づく交通利便性評価指標郡とその地方都市への適用, 土木計画学研究・論文集, Vol.23, No.3, pp.675-686, 2006.
- 10) 近藤竜平, 塩見康博, 宇野伸宏: アクセシビリティと連結信頼性を考慮した道路網・医療施設計画モデル, 土木計画学研究・論文集, Vol.27, No.3, pp.579-588, 2010.
- 11) 鈴木宏幸, 鈴木温: 立地誘導施策評価のための生活必需品に関するアクセシビリティ評価ー愛知県瀬戸市を対象としてー, 都市計画論文集, Vol.51, No.3, pp.709-714, 2016.
- 12) Yen, J. Y.: Finding the K shortest loop less paths in a network, *Management. Science*, Vol.17, No.11, pp.712-716, 1971.
- 13) Eppstein, D.: Finding the k Shortest Paths, *SIAM Journal on Computing*, Vol.28, No.2, pp.652-673, 1998.

第 4 章 現実道路ネットワークへの災害危険箇所数を指標とした道路の災害リスク評価手法の適用

4.1 はじめに

第 3 章では災害対応の実施可能性の視点から 2 つの道路の災害リスク評価手法を構築した。また、これら手法を単純仮想ネットワークへそれぞれ適用することでその挙動確認を行った。しかし、現実の道路ネットワークへ適用した場合の結果の妥当性の検証や評価結果の特性の把握は行われていない。そこで、本章では実際の道路ネットワーク・地域防災計画を対象としたケーススタディを行い、手法の妥当性の検証および特性の把握を行なう。具体的には、石川県の緊急輸送道路ネットワークと地域防災計画を対象としたケーススタディを行なう。また、ケーススタディは 2 つの提案手法それぞれに対して実施する。ただし、2 つの手法のうち拡張手法にあたる「経路距離を考慮した災害危険箇所数を指標とした道路の災害リスク評価手法」については、手法単独での妥当性の検証に留まらず、基礎手法と分析結果を比較した場合における妥当性の検証も行なう。

4.2 ケーススタディの条件設定

本節ではケーススタディのための各種分析条件を整理する。ケーススタディでは石川県の緊急輸送道路ネットワークを対象とし、拠点ペア設定として石川県の地域防災計画を参照する。まず、対象とした道路ネットワークの概形と拠点ペア位置関係、想定自然災害、災害危険箇所の要件定義といった災害リスク評価のための各種条件を整理する。なお、本研究で提案する 2 つの手法はいずれも第 3 章に示したフレームワークに沿い、分析者の目的に応じた条件設定がなされることで現実道路ネットワークへの適用が可能となる手法である。本章では手法の妥当性検証や特性把握の他に、分析事例を示すことで手法の適用手順を示すことも目的としている。

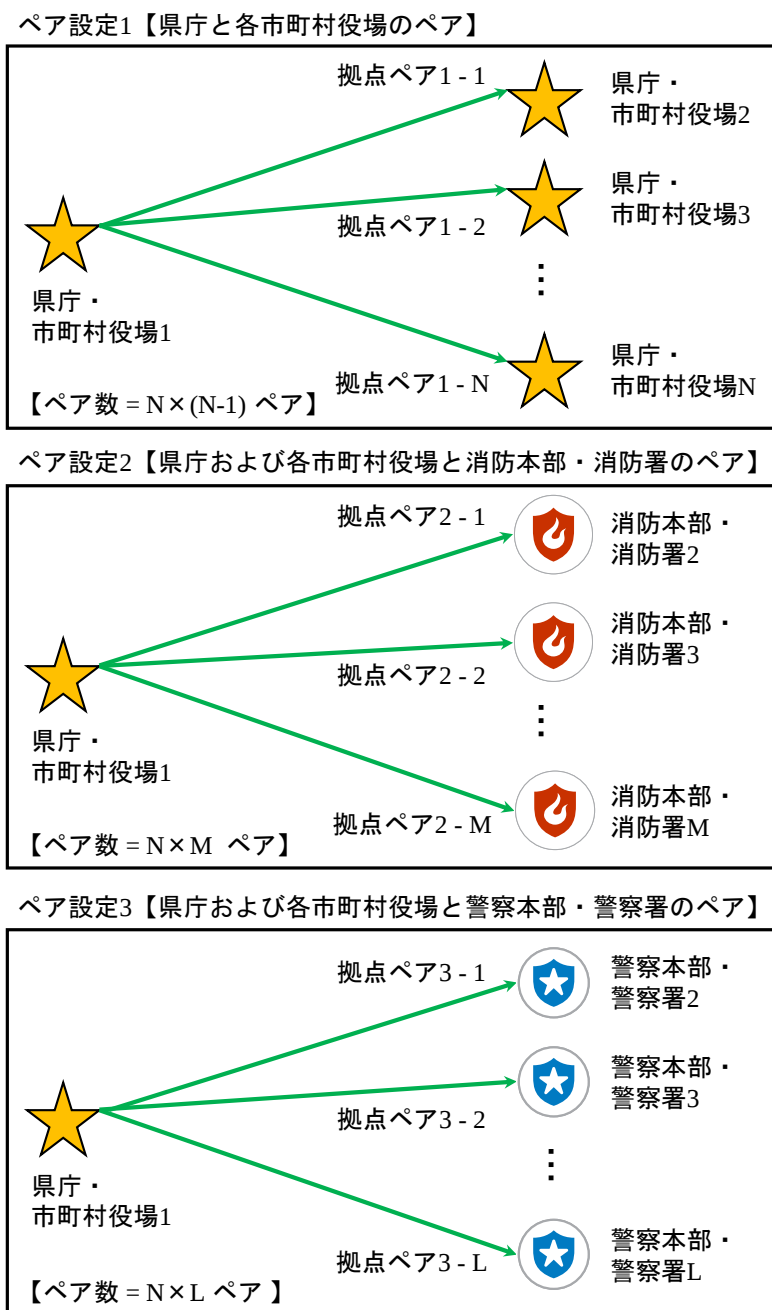
4.2.1 災害リスク評価のための各種条件設定

(1) 対象道路ネットワーク・拠点ペア・想定ハザードの設定

本節冒頭に述べたように、石川県の緊急輸送道路ネットワークを対象とする。拠点ペア設定としては、石川県の地域防災計画¹⁾における緊急輸送道路ネットワークの整備要件に記された「第1次緊急輸送道路で接続する防災拠点」を参考に設定する。具体的には、県庁、市町村役場、消防本部・消防署、警察本部・警察署を対象の拠点施設とした。これら拠点施設を基に、県庁と各市町村役場のペア、県庁および各市町村役場と消防本部・消防署のペア、県庁および各市町村役場と警察本部・警察署のペアとした（図-4.1 参照）。これは、災害対応のための移動行動として特に救命・救急活動や救助活動を想定したものである。加えて、県庁および市町村役場が各地域の代表的地域を示すと考え、それら代表的な地点間での移動と、代表的な地点までの救命・救急活動および救助活動を想定している。ところで、警察および消防署には管轄の概念が存在するため、管轄外の県庁・市町村役場もペアに含まれていることは一見不自然に見える。しかし、東日本大震災では、福島県警の本部庁舎が被災したことで災害対策本部機能が福島県警察署に移転されるという事例がみられた²⁾。すなわち、本部・各署の庁舎そのものが被災した場合に、その機能が他の本部・署に移転される可能性も考えられることから、管轄区域外の県庁・市町村役場も拠点ペアに含めることとした。以上の条件設定を踏まえると、対象とした道路ネットワークの概形および拠点ペアの位置関係は図-4.2のように表現される。なお、石川県の地域防災計画に記述されている防災拠点は他にも多数存在するが、ここでの目的が提案手法の妥当性・特性の評価・把握であることを踏まえ、簡易な拠点ペア設定としている。本手法を適用する際には、分析の目的に応じて適切に拠点ペア設定を検討する必要がある。

次に、想定ハザードを設定する。ここでは対象ハザードを地震とする。また、ハザードの規模としては50年間超過確率2%以上となるような計測震度³⁾を設定する（図-4.3）。この設定は、今後50年間で2%以上の確率で発生する最大の計測震度を対策の水準として設定した場合を想定したものである。ここで、地震を対象とした場合はこのような確率論的地震動予測地図以外に震源断層（シナリオ地震）を想定ハザードとすることもできる。前者では各メッシュで対象期間中の対象確率下での最大の計測震度をもとに災害リスク評価を行なうことになり、後者ではあるシナリオで地震動が発生した場合の各メッシュでの推定計測震度をもとに災害リスク評価を行なうことになる。後者では震源からの距離や地盤の特性によって対象地域内での推定計測震度の分布は変化する。一方で、前者ではすべてのメッシュで最大となる計測震度の分布となるため、対象地域内で計測震度分布に大きな差は生じにくい。すなわち、災害危険箇所の要件定義次第では、前者ではハザードの規模ではなく道路ネットワークの形状と拠点ペア設

定が支配的な災害リスク評価結果となる可能性がある。したがって、本手法を適用する際にはハザード設定の違いが災害リスク評価結果に大きく影響する場合があることを認識した上で、分析者の目的に合致した適切なハザード設定が行われる必要がある。



各拠点の総数の定義：

県庁・市町村役場数：N 消防本部・消防署数：M 警察本部・警察署数：L

図-4.1 拠点ペア設定の概念図

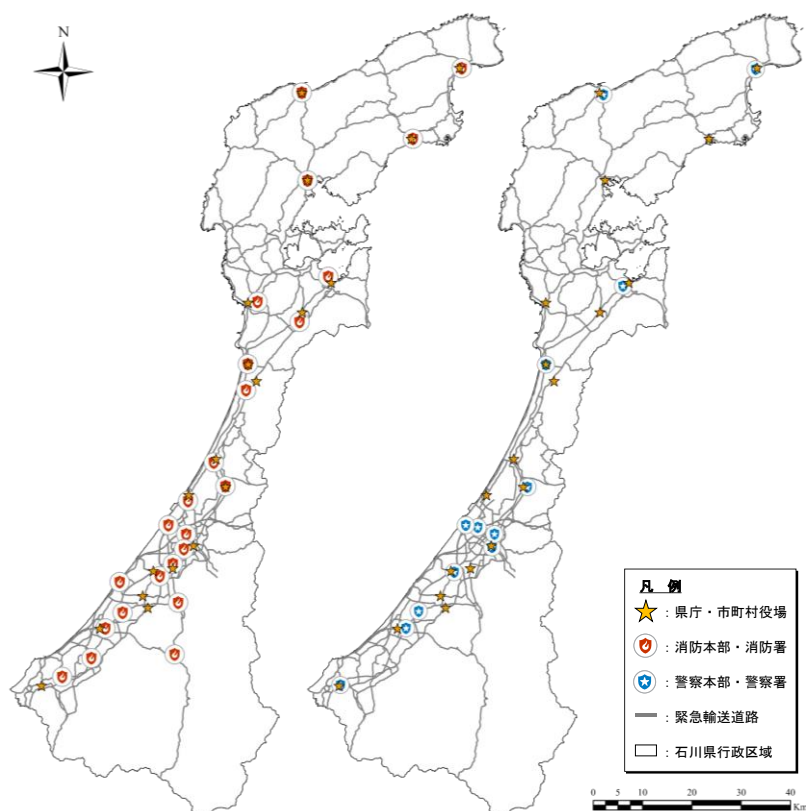


図-4.2 石川県の緊急輸送道路ネットワークおよび対象防災拠点の分布

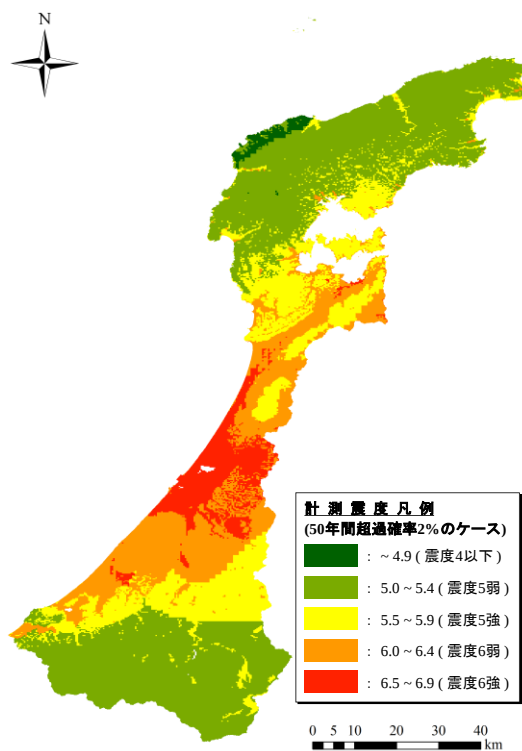


図-4.3 石川県における50年間超過確率2%以上となる計測震度地震動の分布

(2) 災害危険箇所の要件定義

ここでは3.2節に事例を示した建物倒壊、橋梁の落橋・損傷、斜面崩壊の3要素に着目して、同様の方法で災害危険箇所の要件を定義する。ただし、橋梁の管理データを入手できなかったため橋梁に関しては代替手法を検討する。具体的には、橋梁の立地地点をデジタル道路地図⁴⁾（以降、DRM）を用いて仮定し、劣化状況を小川・近田⁵⁾の研究を参考に設定する。

DRMは詳細なデータベースであり、道路の諸属性の1つとして、リンク内に橋梁あるいは高架を含むことを示すフラグを有している。このフラグが付されたリンクには橋梁が1橋存在すると考えることで、橋梁の立地地点を仮定する。このようにして得た橋梁データと想定地震動の予測地図を重ね合わせ、想定計測震度が5.5以上である橋梁を災害危険箇所の候補として抽出する。次に、これら候補橋梁への劣化属性の付与方法を検討する。小川・近田⁵⁾は本分析と同様に石川県を対象として橋梁の劣化損傷を考慮した災害時の緊急輸送道路の接続性に関して考察している。彼らの研究では石川県および国土交通省金沢河川国道事務所の橋梁点検データを用いるとともに、それらデータにおける健全度の分布を示している。そこで、前述の手順で抽出した橋梁は、小川・近田⁵⁾が示した健全度の割合と同様の状態を持つと仮定する。また、小川・近田⁵⁾で示された健全度は5段階であり、その内「軽度の劣化損傷があり、計画的に維持管理補修する」と定義された健全度3以下の状態を劣化橋梁とする。以上の定義により、式(4.1)によって劣化橋梁数は算出できるが、どの橋梁が劣化属性を持つかは定まらない。そこで、候補として抽出された橋梁データに対して、式(4.1)から求められた劣化橋梁数分の橋梁にランダムに劣化橋梁属性を付与する。

$$N_{br}^d = N_{br} \times r_{br}^d \quad (4.1)$$

ここで、

N_{br}^d ：劣化橋梁数、 N_{br} ：災害危険箇所候補の橋梁数、 r_{br}^d ：劣化橋梁割合

斜面防災点検結果および土砂災害特別警戒区域の指定状況とから一意に災害危険箇所が定まる斜面とは異なり、建物・橋梁は災害危険箇所がランダムに与えられる。そこで、ランダムでの災害危険箇所判定を十分な回数試行し、最終的にその結果を平均化することで、各リンクの災害危険箇所数を定める。この手順をフロー図として示したものが図-4.4である。なお、本フローは図-3.2における「フロー②各リンクの災害危険箇所の該当判定」および「フロー③各リンクの災害危険箇所数の集計」に相当するものである。

本分析では「十分な試行回数」として10万回を設定した。この回数で各リンクの災害危険箇所数の設定が収束しているかを、式(4.2)のように定義した災害危険箇所数の平均変化率(図-4.5)

から確認する．なお，式(4.2)はある試行段階における各リンクの災害危険箇所数とその直前試行段階における災害危険箇所数から求められる変化率を平均化することを意味する．図-4.5より，試行段階が進むごとに平均変化率は低下していくことを読み取ることができ，10万回目には十分収束していることが確認できる．

$$\bar{rc}_{link}^{(s)} = \frac{1}{N_{link}} \sum_{a=1}^{N_{link}} \frac{|N_a^{w,(s-1)} - N_a^{w,(s)}|}{N_a^{w,(s-1)}} \quad (4.2)$$

ここで，

$\bar{rc}_{link}^{(s)}$: s 回目の試行段階におけるリンク災害危険箇所数の平均変化率，

N_{link} : 全リンク数， $N_a^{w,(s-1)}$: $s-1$ 回目の試行段階におけるリンク a の災害危険箇所数，

$N_a^{w,(s)}$: s 回目の試行段階におけるリンク a の災害危険箇所数

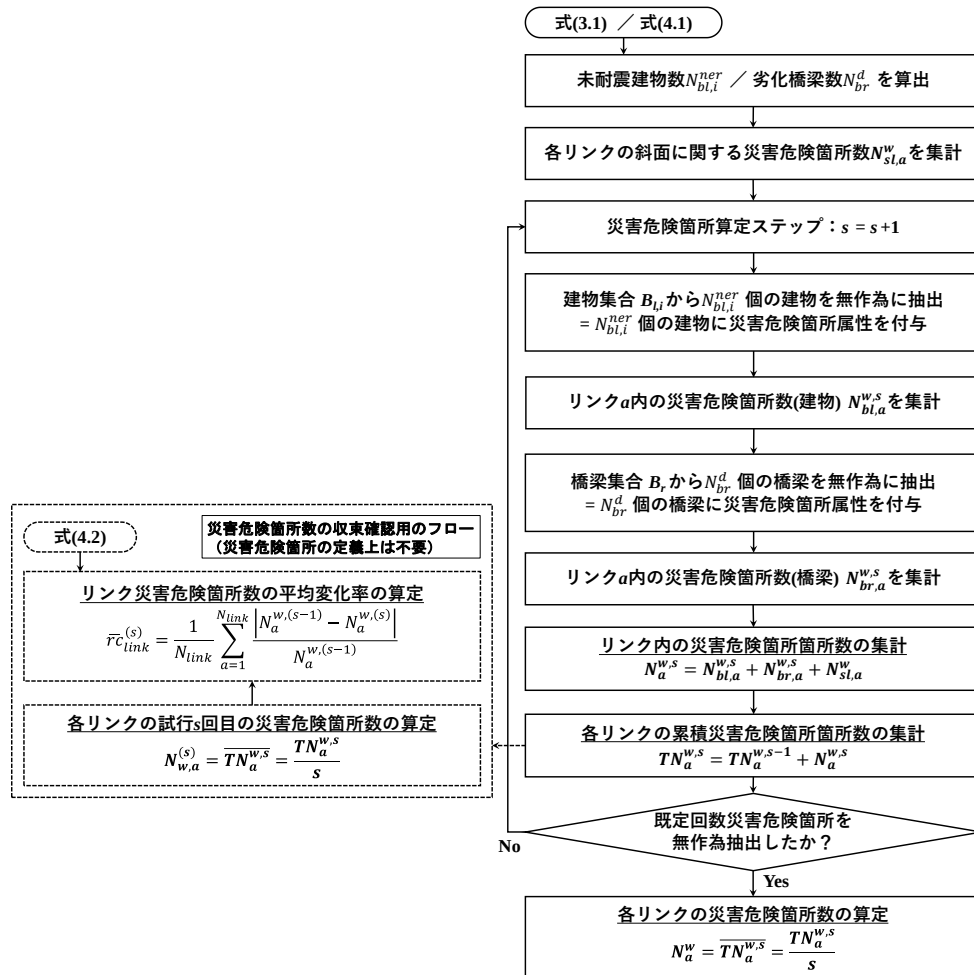


図-4.4 各リンクの災害危険箇所数の算定フロー

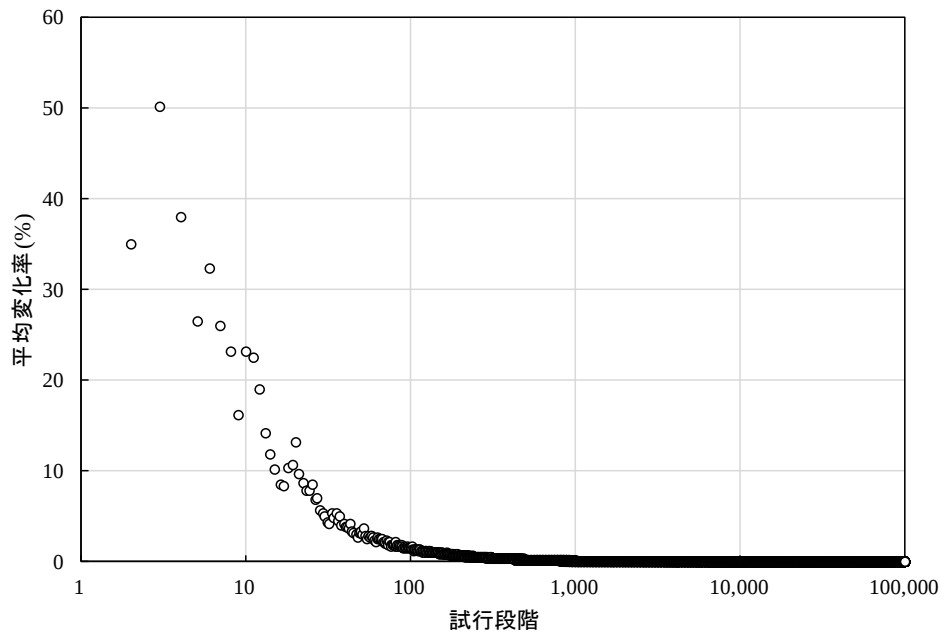


図-4.5 リンクの災害危険箇所数の平均変化率の推移

4.3 基礎手法に関するケーススタディ

本節では 3.3 節で構築した「災害危険箇所数を指標とした道路の災害リスク評価手法」について、前節に示した条件設定でケーススタディを行い、その結果から提案手法の妥当性を検証するとともに、評価結果の特性（手法の特性）を分析する。なお、本分析の目的は提案手法の妥当性および特性の評価・把握にあり、分析対象とした石川県の緊急輸送道路ネットワークや地域防災計画の良し悪しの議論は目的としていない。

4.3.1 災害リスク評価結果とその妥当性と特性の分析および考察

(1) 評価結果の収束状況の確認

本分析では 10 万回の試行を経て各リンクの災害危険箇所数を算定している。各リンクの災害危険箇所数が変動すれば、当然拠点ペアの経路評価結果および各リンクの対策注目度の算定結果も変動する。そこで、本提案手法における災害リスク評価の最終結果である対策注目度について、式(4.3)のように定義した平均変化率を用いて、その収束状況を確認する。なお、式(4.3)

はある試行段階での各リンクの対策注目度と、その前試行段階での各リンクの対策注目度とから求められる変化率を全リンクで平均化した値であることを意味する。

$$\bar{rc}_{E_a}^{(s)} = \frac{1}{N_{link}} \sum_{a=1}^{N_{link}} \frac{|E_a^{(s-1)} - E_a^{(s)}|}{E_a^{(s-1)}} \quad (4.3)$$

ここで、

$\bar{rc}_{E_a}^{(s)}$: s 回目の試行段階におけるリンク対策注目度の平均変化率,
 N_{link} : 全リンク数, $E_a^{(s-1)}$: $s-1$ 回目の試行段階におけるリンク a の対策注目度,
 $E_a^{(s)}$: s 回目の試行段階におけるリンク a の対策注目度

図-4.6 に試行段階ごとの対策注目度の平均変化率を示す。これより、全体的な傾向として、試行段階が進むごとに対策注目度も収束していく傾向にあることが確認できる。ただし、災害危険箇所数がわずかに変動した場合でも経路評価の結果が変化する場合があります。ただし、このような試行段階の後半であっても平均変化率が上昇するケースも見受けられる。ただし、このような場合でも多くの場合で平均変化率の値そのものは小さいことや、平均変化率が上昇した直後には再び収束していくことが確認できることから、最終的な対策注目度の評価結果が大きく偏る可能性は低いと考えられる。対象とするネットワークや拠点ペアの規模によって適切な試行回数に変動するが、本分析で設定した諸条件下（道路ネットワーク・拠点ペア・災害危険箇所）では、少なくとも10万回以上の試行回数を設ければ信頼に足る評価結果を得られることが確認されたと言える。

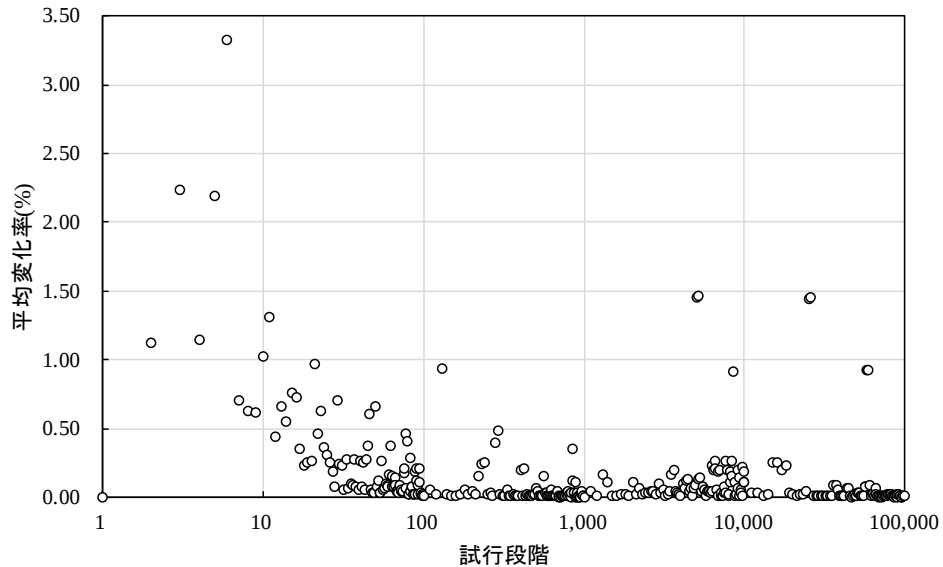


図-4.6 試行段階ごとのリンクの対策注目度の平均変化率

(2) 各リンクの対策注目度の算定結果

図-4.7に各リンクの対策注目度 E_a の空間分布を示す。これより、対策注目度の評価が特に高いリンク（図中の濃橙色～赤色）は石川県中央から志賀町の範囲に多く分布していることが確認される。これらリンクの中でも特に対策注目度の高いリンクの空間分布を確認するため、対策注目度の上位20リンクのみを抽出した（図-4.8）。これら2つの図から読み取れる特徴的な結果として、最も対策注目度が高いリンクは羽咋市と志賀町の海側の境界付近に位置していること、次に対策注目度が高いリンクは金沢市と内灘町の境界付近に位置していることが挙げられる。以下に、このような結果が得られたことに対する考察を示す。

まず、対策注目度が算定されたリンク（灰色以外のリンク）に不連続な区間が観察される理由を再確認する。対策注目度 E_a の定義式（式(3.3)）より、災害危険箇所を持たないリンクの対策注目度 E_a は0となる。すなわち、図-4.7および図-4.8で着色されているリンクはすべて、何らかの災害危険箇所を有している。先に取り上げた2地域では、河川が横断しているために橋梁区間が多く、橋梁に関する災害危険箇所が多い。また、緊急輸送道路が山地を横断するため、斜面崩壊に関する災害危険箇所も多い。反対に、金沢市の中心部では橋梁区間や山地が非常に少ないことに加え、緊急輸送道路沿道にある建物の多くが非木造建築であり、木造建物でも道路から十分に離れた位置に立地している場合が多い。このため災害危険箇所が定義されるリンクが限定的であるため、対策注目度 E_a が0であるリンクが多い。

次に、図-4.7および図-4.8について、対策注目度が高いリンクの空間分布の妥当性を検証する。道路ネットワークの概形から明らかなように、県中央部から志賀町にかけては石川県の地理的構造上、緊急輸送道路の路線数が少ない。すなわち、この区間は一部のリンクに経路が集中しやすい条件を持っている。加えて、図-4.2の拠点分布図から分かるように、拠点ペア設定には県北部の拠点と県南部の拠点というペアが多く含まれている。これは、先に述べた県中央部から志賀町にかけた区間を必ず通過する拠点ペアが多いことを意味する。以上を整理すると、当該区間を通過する経路数自体が多く、かつそこは一部のリンクに経路が集中しやすい区間であることから、対策注目度が高く算出されたという結果は妥当であると評価できる。

ところで、本分析では、各災害危険箇所の要件の1つを「計測震度5.5以上の地震動が想定されること」とした。図-4.3からは能登地方では広い範囲で計測震度は5.4以下であり、能登地方は広い範囲で災害危険箇所が定義されない条件を持っているように読み取れる。すなわち、能登地方では対策注目度が0となるリンクが広く分布することが推測される。一方、図-4.7はそのような結果を示していない。そこで、図-4.3と図-4.7を重ね合わせて能登地方を拡大した図（図-4.9）を用いて、結果の妥当性を確認する。これより、対策注目度が算定されているリンク全てが、計測震度が5.5以上となる区間を通過していることが確認できる。

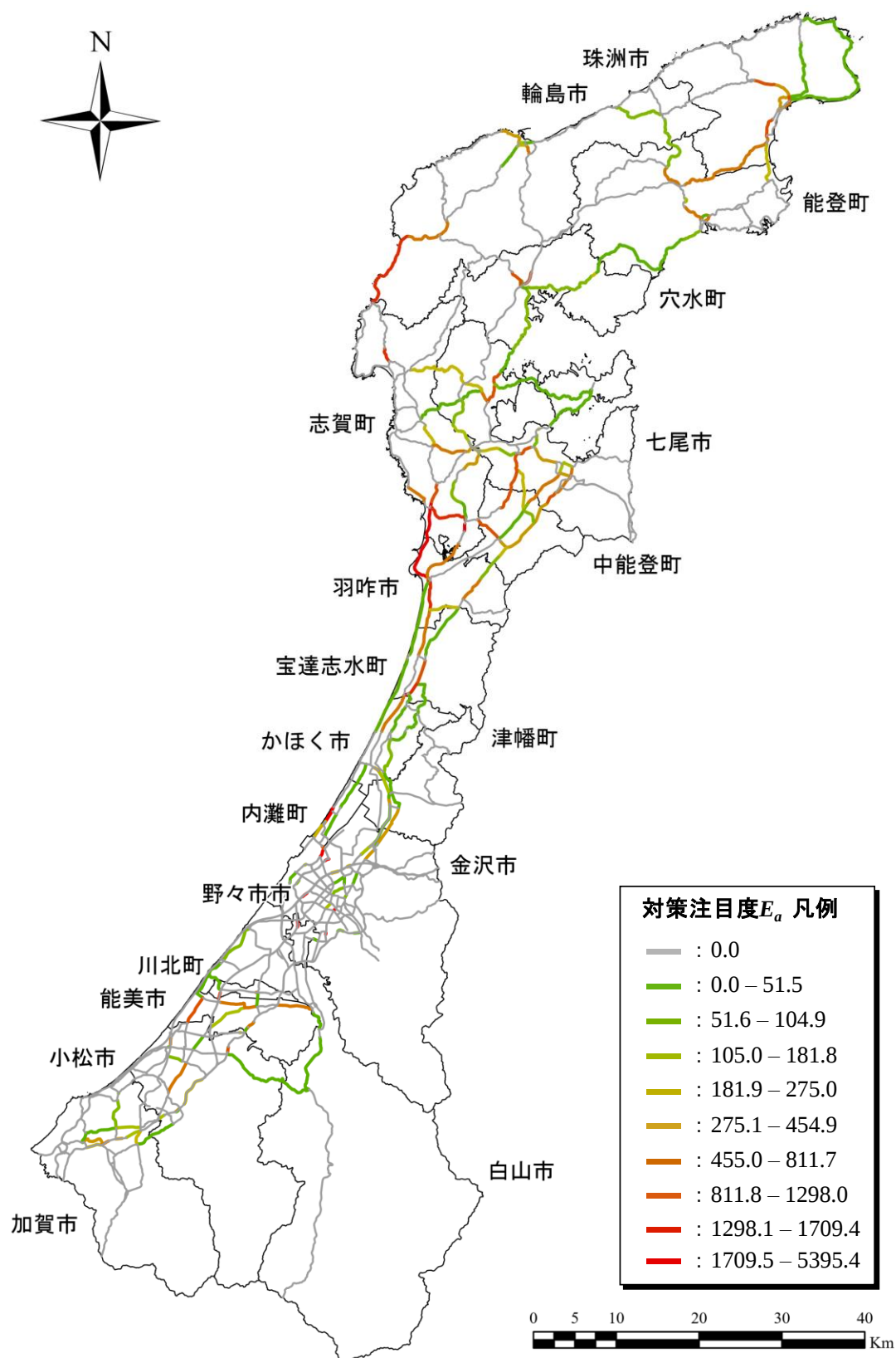


図-4.7 各リンクの対策注目度の空間分布

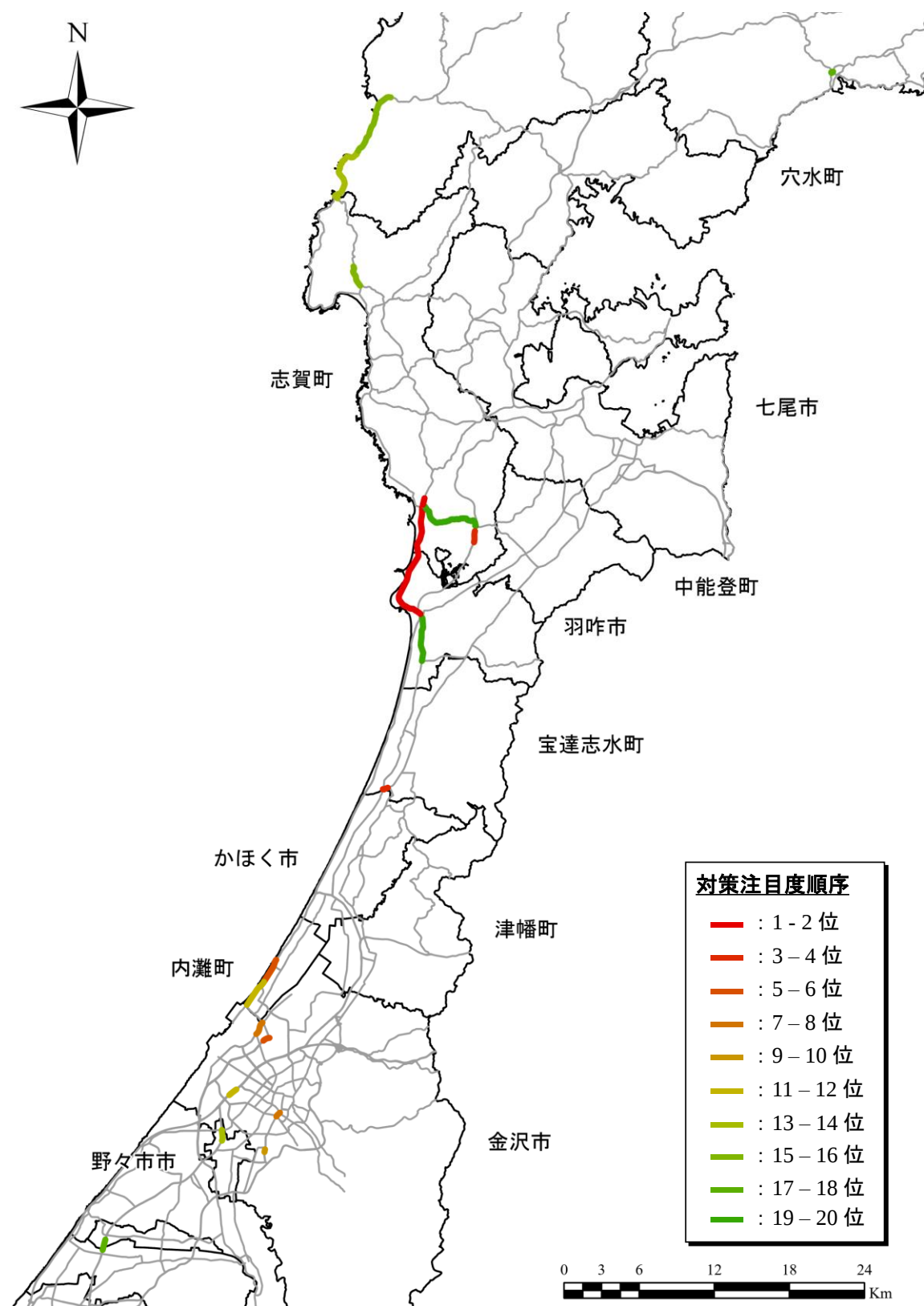


図-4.8 対策注目度上位 20 位までのリンクの空間分布

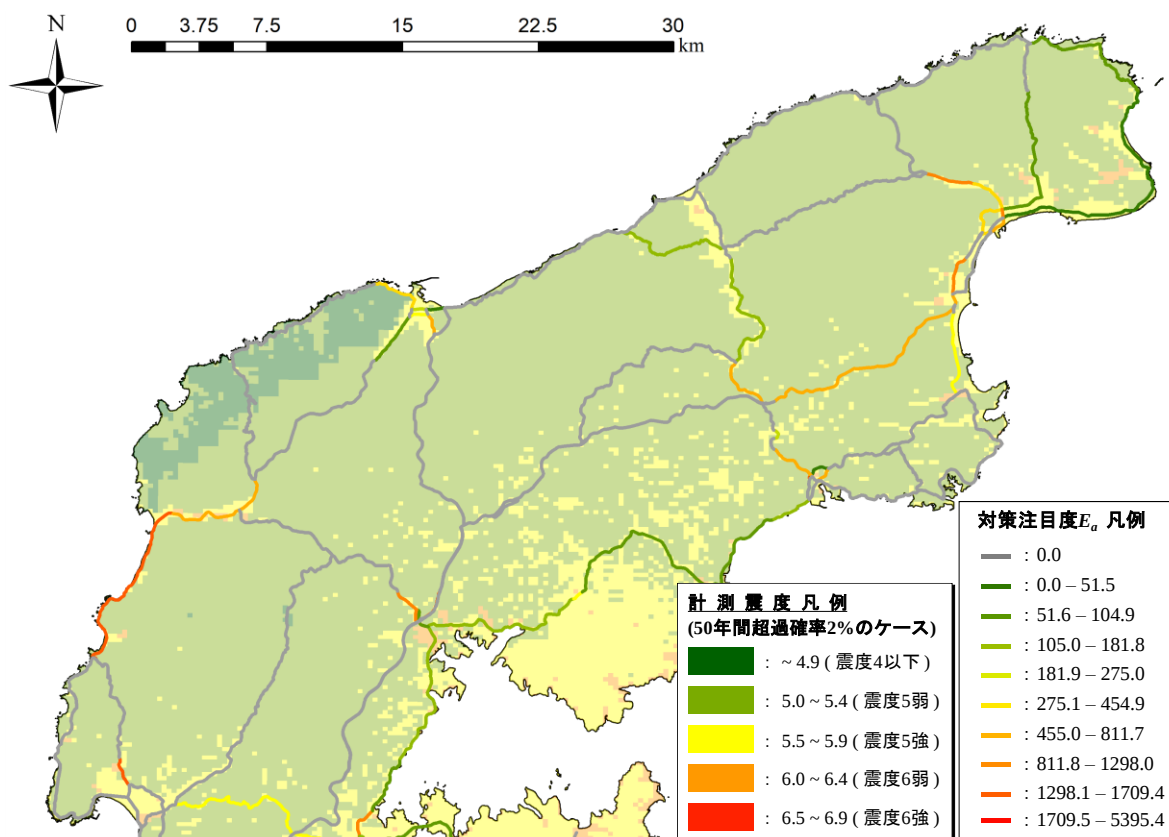


図-4.9 能登半島にフォーカスした想定地震動と対策注目度の空間分布の重ね合わせ図

(3) 各拠点ペア間の経路を構成するリンクの特性に関する分析

本提案手法では、各拠点ペアに対して、対策候補となる2つの経路（第1経路・第2経路）を評価・抽出する。この時、経路を構成するリンクがどのような特性を持っていたかは、提案手法による評価の特性を把握する上で重要な項目の1つである。そこで、ここでは経路評価における指標値である災害危険箇所数に着目して、各拠点ペア間の経路を構成するリンクの特性を分析する。具体的には、i)各リンクにおける経路の通過率、ii)各リンクの災害危険箇所数と経路の通過率の関係性の2つの視点で分析する。

i) 各リンクにおける経路の通過率に関する分析

図-4.10および図-4.11に災害危険箇所を有するリンク（以下、危険リンク）における経路の通過率のヒストグラムを示す。前者はすべての危険リンクを対象としたヒストグラムであり、後者は1本以上の経路が通過した危険リンクのみを対象としたヒストグラムである。これらは、全経路の内、どの程度の割合の経路が各危険リンクを通過していたかを示すグラフである。図-4.10より、62.7%の危険リンクが経路通過率0%、すなわちいずれの経路も通過しておらず、

対策候補になっていないことが分かる。また、通過率が5.0%以下のリンクまでで累積相対度数は87.0%であり、大半の危険リンクは経路が通過していないか、一部の経路のみが通過した状態であったことが分かる。以降は経路通過率0%以外の危険リンクに着目して考察する。

ここで、経路通過率が0%以外の危険リンクを「経路通過危険リンク」、経路通過率が0%であるリンクを「経路非通過危険リンク」とそれぞれ表現する。図-4.11より、経路通過率が5.0%以下であった経路通過危険リンクは65.0%であり、経路通過率が10.0%以下までで78.8%に到達する。すなわち、経路通過危険リンクの多くは、一部の拠点ペア間にのみ共通するリンクであることが分かる。また、経路通過率が20%以上の経路通過危険リンクは4.9%であり、拠点ペア全体に共通するようなリンクが少数存在することも分かる。これら結果を道路防災対策の視点から整理すると、拠点ペア全体の対策に寄与できるリンクは一部であり、多くの経路通過危険リンクは一部拠点ペアの対策にのみ寄与できるものであった。加えて、ある程度長期的に対策していくことを想定した時には次のように解釈できる。対策開始当初は対象拠点ペア全体に共通する対策として、経路通過率の高いリンクに着目できる。一方で、このようなリンクは限定されているため、途中段階で拠点ペア個別ないしは、少数拠点ペアのグループ単位での対策への切り替えを検討する必要があることの示唆であるとも解釈できる。

以上を整理すると、対象とした拠点ペア間における最小の災害リスク経路と、それと重複しない条件下での第2の最小災害リスク経路の2つの経路の情報から、表-4.1のような道路防災対策の検討・立案のための基礎資料を得ることができると評価できる。

表-4.1 危険リンクの経路通過率から得られる道路防災対策の検討・立案のための基礎資料

危険リンクの特性	道路防災対策の検討・立案のための基礎情報
経路通過率0%	対策上の注目度は限りなく低いリンク
経路通過率低	拠点ペア個別あるいは少数拠点ペアのグループ単位での対策効果が期待できるリンク
経路通過率高	拠点ペア全体に共通して対策効果を期待できるリンク

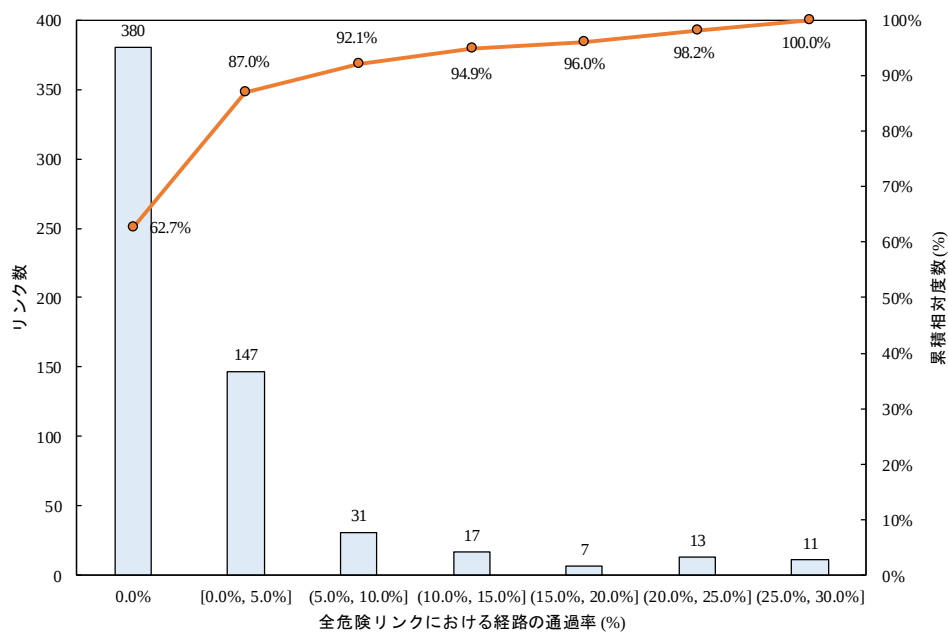


図-4.10 全危険リンクにおける経路の通過率に関するヒストグラム

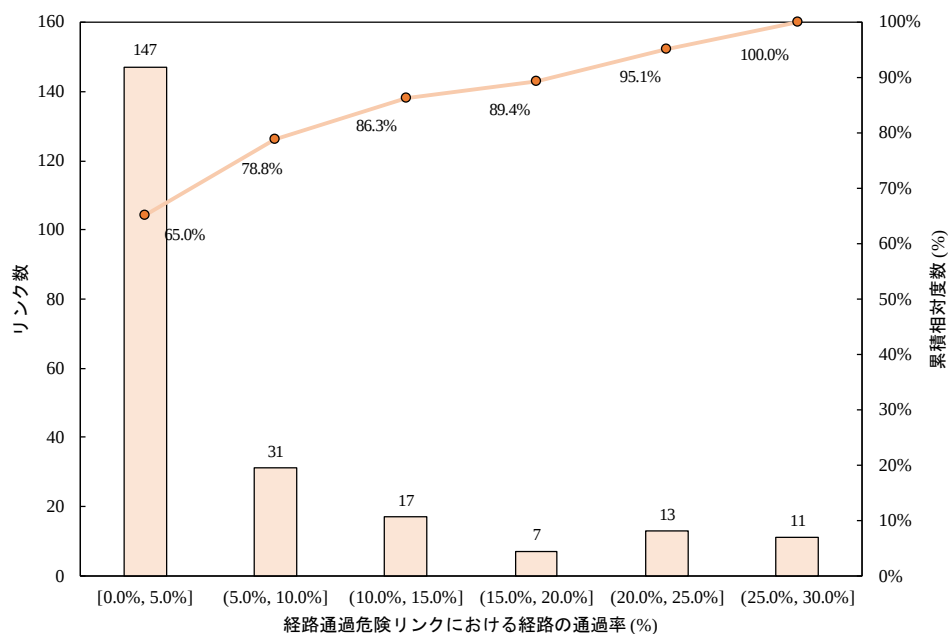


図-4.11 経路通過危険リンクにおける経路の通過率に関するヒストグラム

ii) 各リンクの災害危険箇所数と経路の通過率との関係性に関する分析

経路の通過率が同程度でも、災害危険箇所数の違いによって対策上の解釈は異なる。そこで、各リンクの災害危険箇所数と経路通過率との関係性について分析・考察する。

図-4.12および図-4.13に危険リンクの災害危険箇所数に関するヒストグラムを示す。また、図-4.14に各経路通過危険リンクと経路通過率との関係性を示す。図-4.14より、経路通過率の大小に依らず、大半の経路通過危険リンクの災害危険箇所数は1箇所以下である。ただし、危険リンクの災害危険箇所数の分布自体が1箇所以下のリンクに集中しており（図-4.12）、災害危険箇所数1箇所以下のリンクを優先的に経路が通過したことを示すものではない。一方で、危険リンクを経路通過の有無別に比較すると、災害危険箇所数1箇所以下の領域では経路通過危険リンクの方が累積相対度数が大きい（図-4.13）。すなわち、災害危険箇所数がより少ないリンクを経路が通過していることが分かる。これは経路の評価方法から観て自然な結果である。

次に、図-4.14について、経路の通過率が(0.0%, 15.0%]の範囲にあるリンクを通過率低、(15.0%, 30.0%]の範囲にあるリンクを通過率高と分類して、対策の検討・立案のための基礎情報について整理する。通過率高の領域は、拠点ペア全体への対策効果が期待される領域である。式(3.3)の対策注目度指標は、この領域の左上に位置するリンクに着目したものである。反対に、通過率低の領域は拠点ペア個別あるいは小数拠点ペアのグループ単位での対策効果が期待される領域である。この領域に着目する場合の対策方針には、「対象とした拠点ペアのリスクを最も都合良く低減できるリンクに対策する」を想定する。これより、単独拠点ペアが対象の場合は、対策可能な危険箇所数を踏まえて領域右側のリンクに着目すればよい。また、少数拠点ペアのグループが対象の場合は、領域左上に位置するリンクに着目すれば良い。

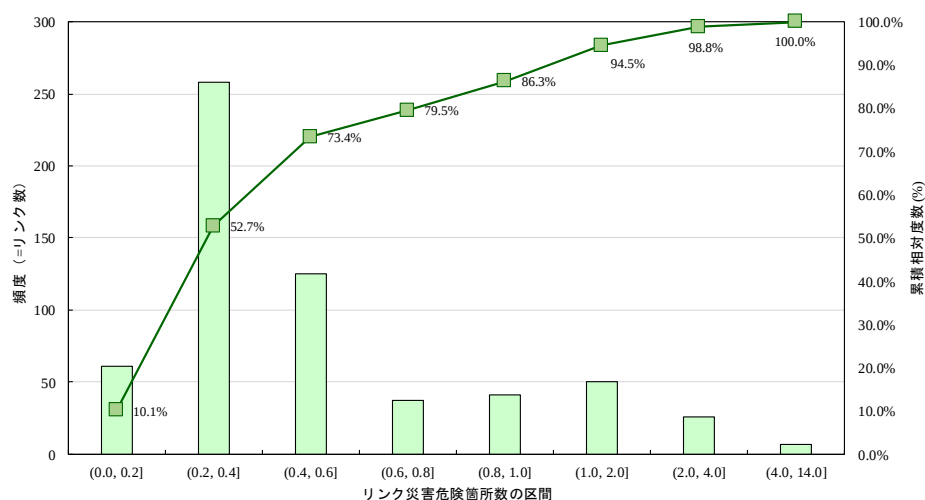


図-4.12 全危険リンクの災害危険箇所数のヒストグラム

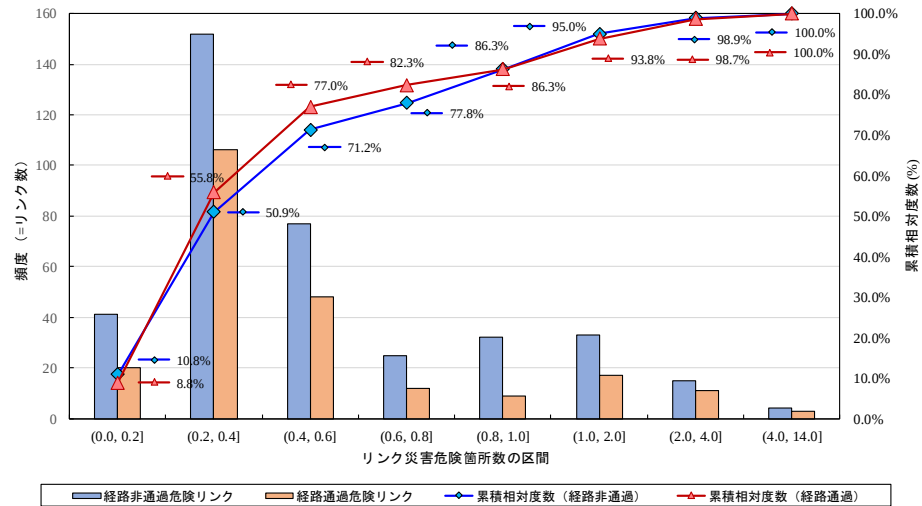


図-4.13 経路非通過危険リンクと経路通過危険リンクの災害危険箇所数のヒストグラム

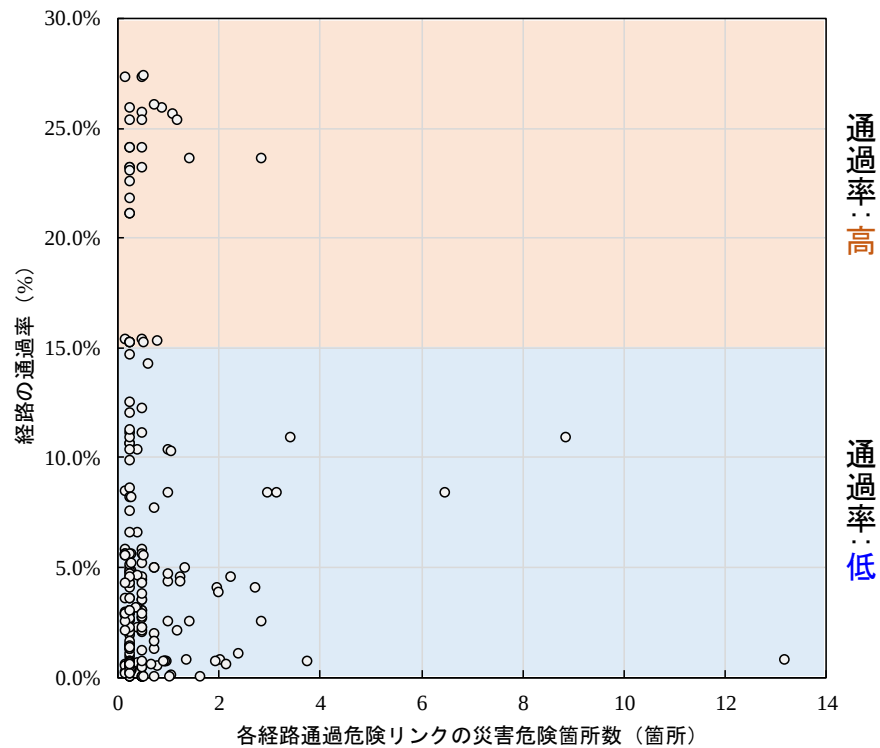


図-4.14 各経路通過危険リンクの災害危険箇所数と経路通過率との関係性

(4) 経路距離と累積災害危険箇所数に関する分析

一般的に、経路距離が長くなるほど通過する災害危険箇所も多くなると推測される。すなわち、経路距離と経路上の災害危険箇所数（以下、累積災害危険箇所数）は比例関係にあると推測される。本提案手法では災害危険箇所数に着目した経路評価を行なうため、途中の災害危険箇所数の多い区間の迂回の有無などで、災害危険箇所数が同程度でも経路距離に差が生じる可能性がある。したがって、この2者の関係性は、評価手法の特性を把握する上で重要な項目の1つになると考えられる。そこで、ここでは散布図を用いてこの2者の関係性を分析する。

図-4.15に、本分析で抽出した経路の経路距離と累積災害危険箇所数の散布図を示す。なお、ここでの経路距離は、経路を構成する各リンクの総延長である。図-4.15より、冒頭に述べたような比例関係が確認できる。一方で、散布図から傾きを読み取ろうとした時、定性的には複数の傾きが混在しているようにも解釈できる。そこで、ここでは定性的な例として、5つのグループに分類し、傾きと合わせて図-4.15中に示した。定量的な分類方法には議論の余地があるが、経路距離と累積通過危険箇所の関係性から、経路をいくつかのグループに分類できる可能性があることが手法の特徴の1つとして確認されたと言える。これによって、対策の検討・立案のための基礎情報として、グループごとの共通の対策箇所や課題の抽出、グループ間での対策の優先度や方針分けなどの検討材料として活用できる可能性があると考えられる。

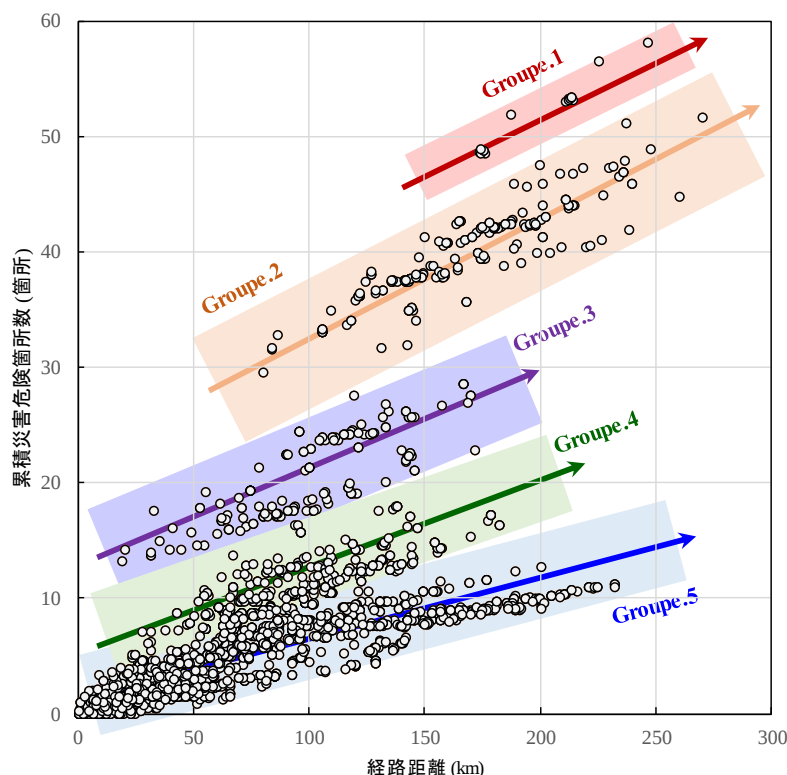


図-4.15 経路距離と累積災害危険箇所数の散布図

(5) 経路距離と最短経路距離に関する分析

(4)にも述べたように、本提案手法では災害危険箇所に着目した経路評価を行なうため、場合によっては拠点ペアの最短経路距離に比して長大な経路が抽出される可能性がある。この点で、抽出した経路が最短経路距離からどの程度乖離しているかは、評価手法の特性として把握されるべき項目の1つと考えられる。そこで、本分析で抽出した各拠点ペア間の各経路について、第1経路と第2経路に分けてその拠点ペア間の最短経路距離との関係性を分析する。

経路距離と最短経路距離との関係性を図-4.16（第1経路）と図-4.17（第2経路）に示す。図中に示した45度線に近いほど、最短経路距離に近い経路であることを示している。まず、近似曲線の傾きは第1経路より第2経路の方が大きいことから、第2経路の方が最短経路距離に比して長大であったことが分かる。一方で、例えば横軸の約80kmから約130kmの範囲における45度線付近（図中青点枠線内）のように、第2経路の方が、経路距離が短い拠点ペアも見られる。そこで、第1経路と第2経路の経路距離を比較した結果、43.0%の拠点ペアで第2経路の方が経路距離が短いことが確認された。以上のように、本分析の条件下では、第1経路の方が第2経路よりも短い傾向となった。ただし、この関係性は道路ネットワークや拠点ペア次第で変動する。手法の特徴としては、「第1経路と第2経路の経路距離はトレードオフの関係にある」とまとめるべきである。これは、例えば第1経路が最短距離に近い経路の場合、それと重複しない条件の第2経路ではそれよりも長い経路とならざるを得ない場合が多いためである。

一方で、道路防災対策の検討・立案のための基礎情報としては、第1経路と第2経路がそれぞれどの程度の距離であるかは重要な資料の1つになりうる。そこで、先に示した散布図の他に経路距離に関する基本統計量を加えて考察しよう。表-4.2に最短経路距離に対する第1経路と第2経路の経路距離の倍率に関する基本統計量を整理した。平均倍率は、第1経路で1.33倍、第2経路で1.65倍程度であった。また、標準偏差からは、第1経路はばらつきが少ないのに対して、第2経路はばらつきが大きいことが分かる。最大倍率は第1経路で8.63倍、第2経路で32.61倍であるが、このような過大な倍率が生じた拠点ペアはもともとの最短経路距離が短いペアである。このような情報が得られた時、抽出した経路が全体的に長大過ぎないかどうかという判断や、経路の距離に偏りがいないかのチェックなどに活用できると考えられる。

表-4.2 第1経路と第2経路の最短経路距離に対する経路距離の倍率に関する基本統計量

経路	平均倍率	最大倍率	標準偏差
第1経路	1.33	8.63	0.324
第2経路	1.65	32.61	1.33

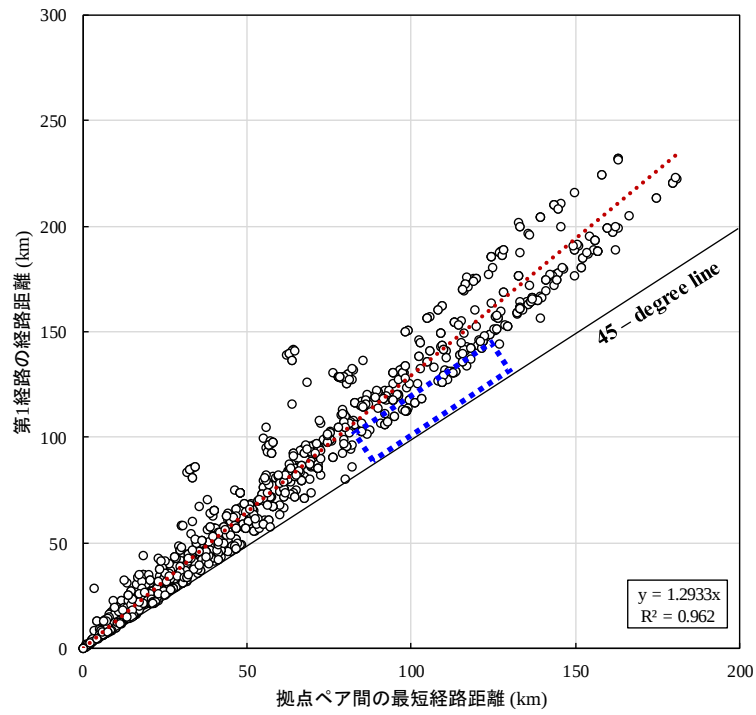


図-4.16 第1経路と拠点ペア間の最短経路距離との関係性

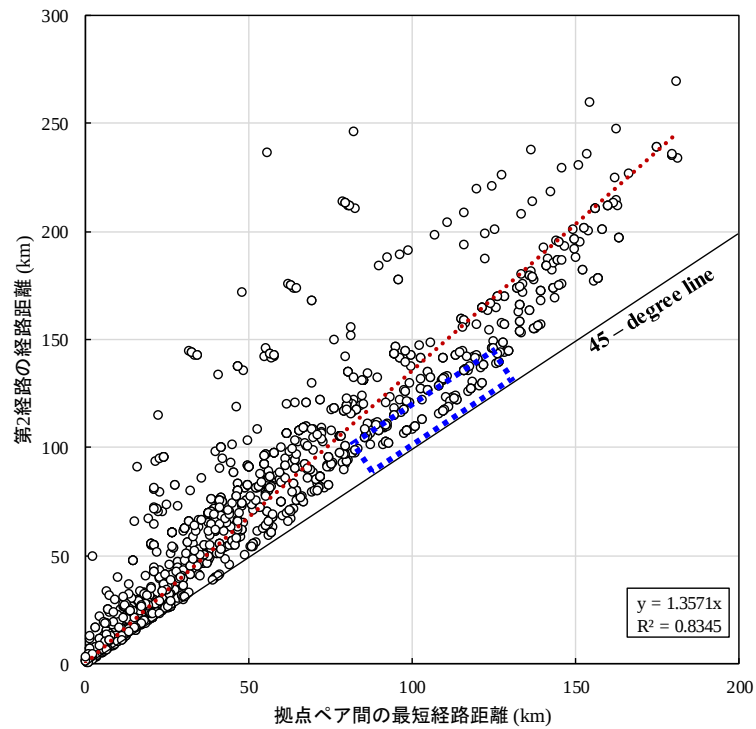


図-4.17 第2経路と拠点ペア間の最短経路距離との関係性

(6) 第2経路抽出の効果に関する分析

拠点ペア間の対策候補として第2経路を定義した目的は、拠点ペア間の経路の冗長性確保にある。ここでは、提案した手法が目的とした効果が得られる枠組みとなっているかを確認するために、第1経路のみを対象としたケース（比較ケース）との分析結果の比較を行なう。また、本分析を通して、本提案手法による経路評価の特性についても同時に把握することを試みる。

第2経路まで考慮する本来の方法（基本ケース）と比較ケースとでは、対象となる経路数が倍異なる。これによって、両ケースを対策注目度の値そのもので比較することは意味をなさない。そこで、ここでは各リンクにおける対策注目度の相対的な値の大小関係に着目して比較を行なう。具体的には、2ケースの対策注目度を同じルールで段階的に区分して色分けすることで結果の差異を可視化する。基本ケースと比較ケースそれぞれの分析結果として、図-4.18に各リンク対策注目度の大小関係を、図-4.19に対策注目度上位20リンクの空間分布をそれぞれ示した。なお、両図とも左側が基本ケース、右側が比較ケースの結果をそれぞれ示している。

図-4.18より、基準ケースの方が対策注目度の値を持つ（ $E_a \neq 0$ ）リンクが多い。これは、経路数が比較ケースの2倍あり、さらに第1経路と可能な限り重複しない経路を考慮していることから容易に説明される。一方、対策注目度が高いリンク（濃橙～赤色）に着目すると、その大部分は共通していることが観察される。これは図-4.19から裏付けられる。対策注目度の順序こそ異なるものの、上位20位に含まれるリンクの構成はその大部分が共通している。一部共通しないリンクもあるが、これらリンクは比較ケースで上位20位であったリンクに近接した位置や、上位20位ではないが比較ケースでも対策注目度の値を持つリンクである。この結果は、同一拠点ペア間では同じリンクはほぼ通過されないが、あるペアで第1経路が通過したリンクを別のペアの第2経路が通過することは当たり前に発生することから理解できる。

以上を踏まえて、第2経路抽出の効果を議論する。比較ケースと基準ケースとで、対策注目度が高いリンクが変化しなかったことから、これらリンクへの対策効果は2つの経路に及ぶことが確認されたと言える。すなわち、拠点ペア全体のリスクを低減する目的と冗長性を確保する目的の両者が達成されていると言える。また、特に対策注目度が低いリンクについては明らかに評価結果が異なることから、対策方針として冗長性の確保まで視野に含めるのか、リスク低減のみを目的とするのかに応じて、第2経路の扱いは慎重に検討される必要がある。また、道路ネットワークの形状によっては、石川県のように第1経路と第2経路が重なるような対策上望ましい区間が現れないことも考えられる。したがって、対象とする道路ネットワークの特徴によっても、第2経路の扱いは慎重に検討される必要がある。

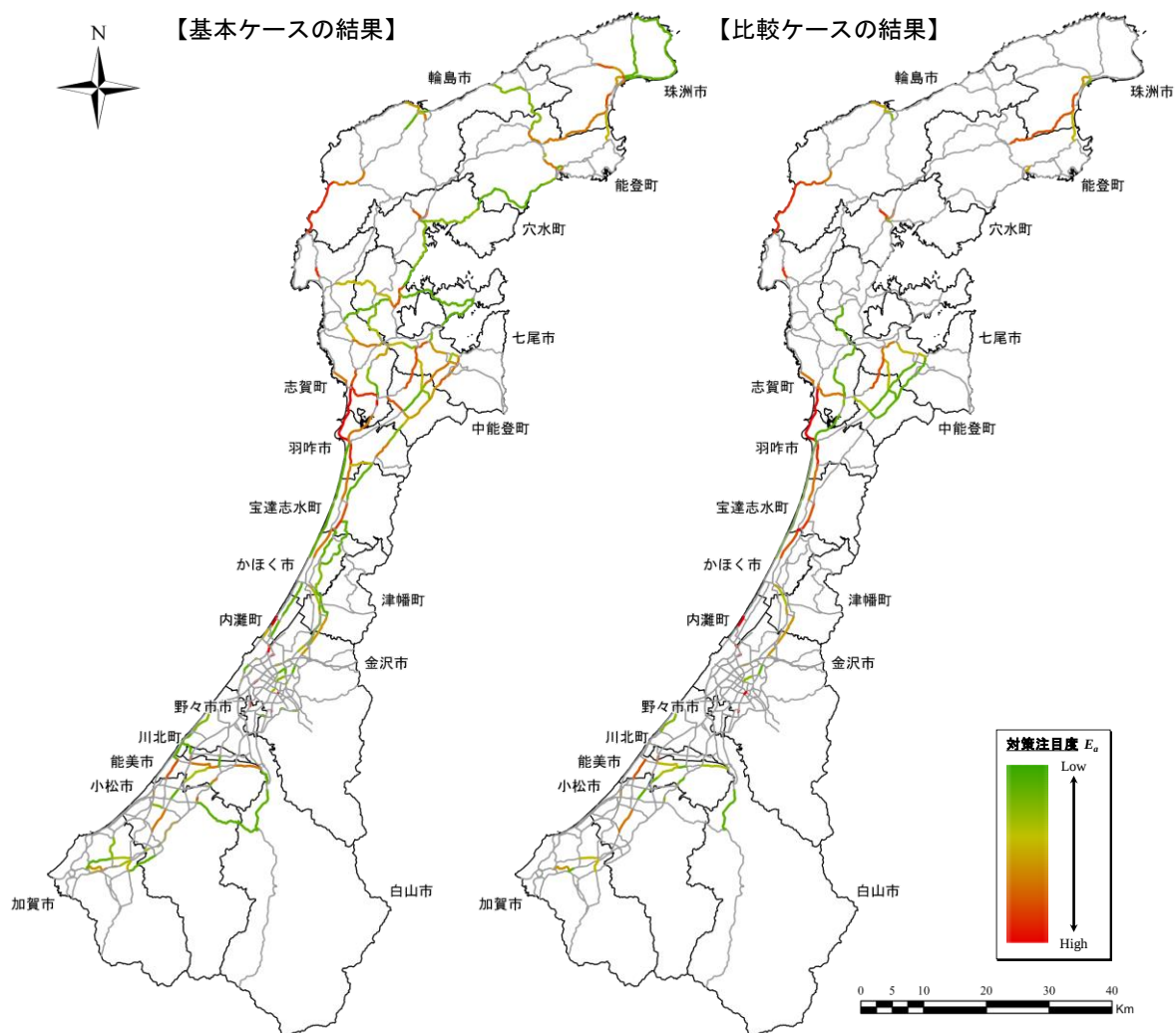


図-4.18 基本ケース（左）と比較ケース（右）の各リンクの対策注目度の大小関係

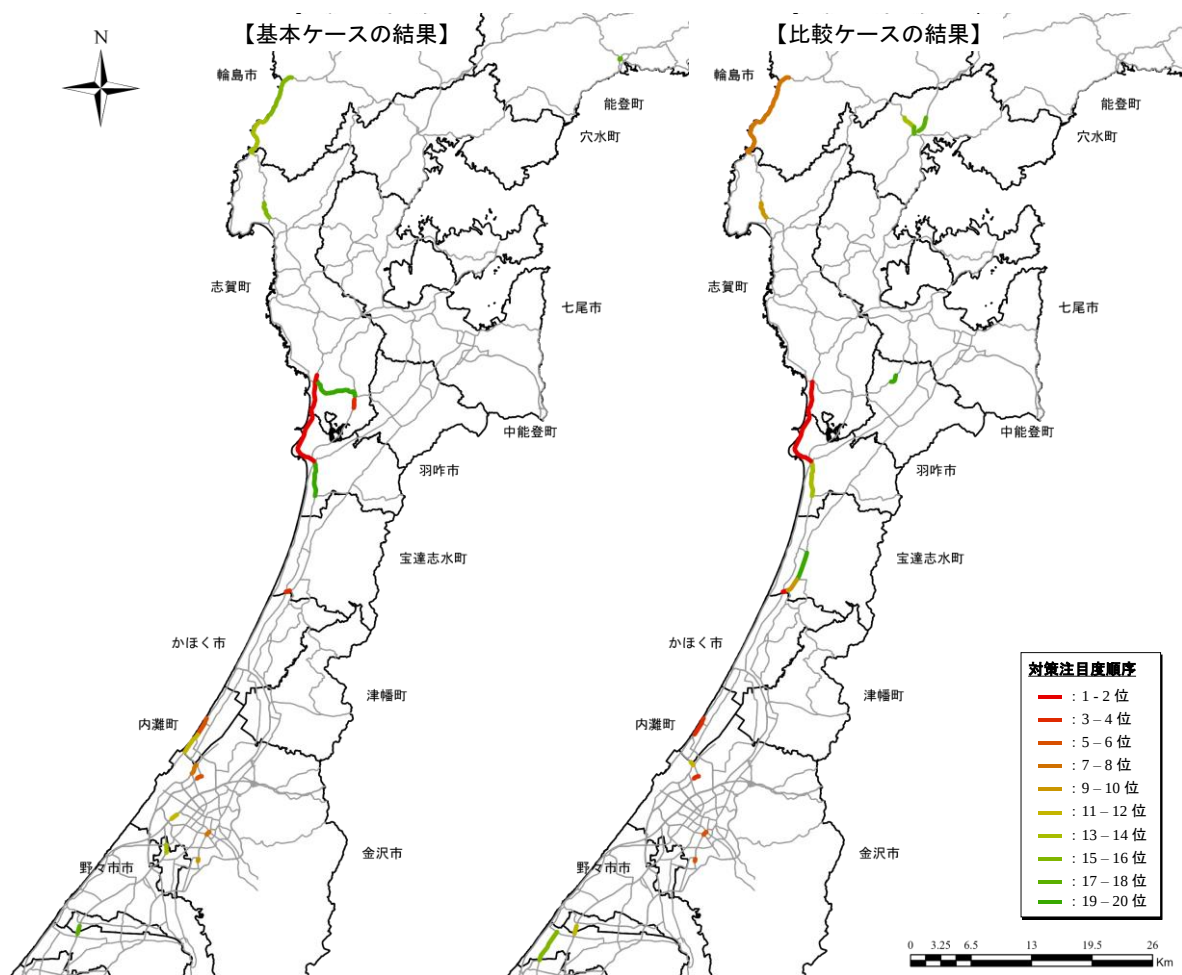


図-4.19 基本ケース（左）と比較ケース（右）の対策注目度上位20リンクの空間分布

4.4 経路距離を考慮した災害リスク評価手法に関するケーススタディ

本節では、3.6節で構築した「経路距離を考慮した災害危険箇所数を指標とした道路の災害リスク評価手法」について、4.2節に示した条件設定でケーススタディを行い、その結果から提案手法の妥当性を検証するとともに、評価結果の特性（手法の特性）を分析する。ただし、基礎手法にはない条件として「許容可能距離」を追加して設定する必要がある。これは「分析者が求める拠点ペア間の対策候補経路の距離水準」に応じて設定されることを想定している。拠点ペアの種類や地域防災計画における位置付け等によって個別の水準を設けることも考えられるが、ここでは便宜的に一律で「各拠点ペア間の最短経路距離の1.5倍」を条件として設定した。なお、本分析の目的は提案手法の妥当性および特性の評価・把握にあり、分析対象とした石川県の緊急輸送道路ネットワークや地域防災計画の良し悪しの議論は目的としていない。

4.4.1 対策注目度の空間分布に関する妥当性の検証

(1) 本手法単独の視点での評価結果の妥当性の検証

まず、本手法を適用して得られた結果を、基礎手法との比較なしに単独の視点で整理する。

図-4.20 に各リンクの対策注目度 E_a の空間分布を示す。これより、対策注目度の評価が特に高いリンク（図中の濃橙色～赤色）は石川県中央部から志賀町にかけての範囲に多く分布していることが確認される。これらリンクの中でも特に対策注目度の高いリンクの空間分布を確認するため、対策注目度の上位 20 リンクのみを抽出した（図-4.21）。この図から、最も対策注目度が高いリンクは羽咋市と志賀町の海側の境界付近に位置していること、次に対策注目度が高いリンクは金沢市と内灘町との境界付近や金沢市内に位置していることが特徴的な結果として読み取れる。以下に、このような結果が得られたことに対する考察を示す。

まず、対策注目度が算定されたリンク（灰色以外のリンク）に不連続な区間が観察される理由を再確認する。対策注目度 E_a の定義式（式(3.3)）より、災害危険箇所を持たないリンクの対策注目度 E_a は 0 となる。すなわち、図-4.20 および図-4.21 で着色されているリンクはすべて、災害危険箇所を有している。例えば、冒頭に取り上げた 2 地域では、河川が横断しており橋梁区間が多数存在することから橋梁に関する災害危険箇所が存在していたり、緊急輸送道路が山地を横断するために斜面崩壊に関する災害危険箇所が存在していたりする。反対に、橋梁区間や山地が非常に少ない金沢市の中心部には着色されたリンクが少ない。災害危険箇所としては建物倒壊の影響を受ける地域だが、緊急輸送道路沿道にある建物の多くが非木造建築であり、木造建物でも道路から十分に離れた位置に立地している場合が多い。このため、災害危険箇所が定義されるリンクは限定的であり、対策注目度 E_a が 0 であるリンクが多い。

次に、図-4.20 および図-4.21 について、対策注目度が高いリンクの空間分布が、冒頭に述べたようなものとなることの妥当性を検証する。道路ネットワークの概形から明らかなように、県中央部から志賀町にかけては石川県の地理的構造上、緊急輸送道路の路線数が少ない。すなわち、この区間は一部のリンクに経路が集中しやすい条件を持っている。加えて、図-4.2 に示した拠点分布図からわかるように、県北部の拠点と県南部の拠点という組み合わせの拠点ペアが多く存在している。すなわち、前述した県中央部から志賀町にかけた区間を必ず通過する拠点ペアが多い評価条件となっている。以上を整理すると、当該区間を通過する経路数自体が多く、さらにその区間は一部のリンクに経路が集中しやすい条件を持つことから、高い対策注目度を持つリンクが分布しているという冒頭の結果が得られたことは妥当であると評価できる。

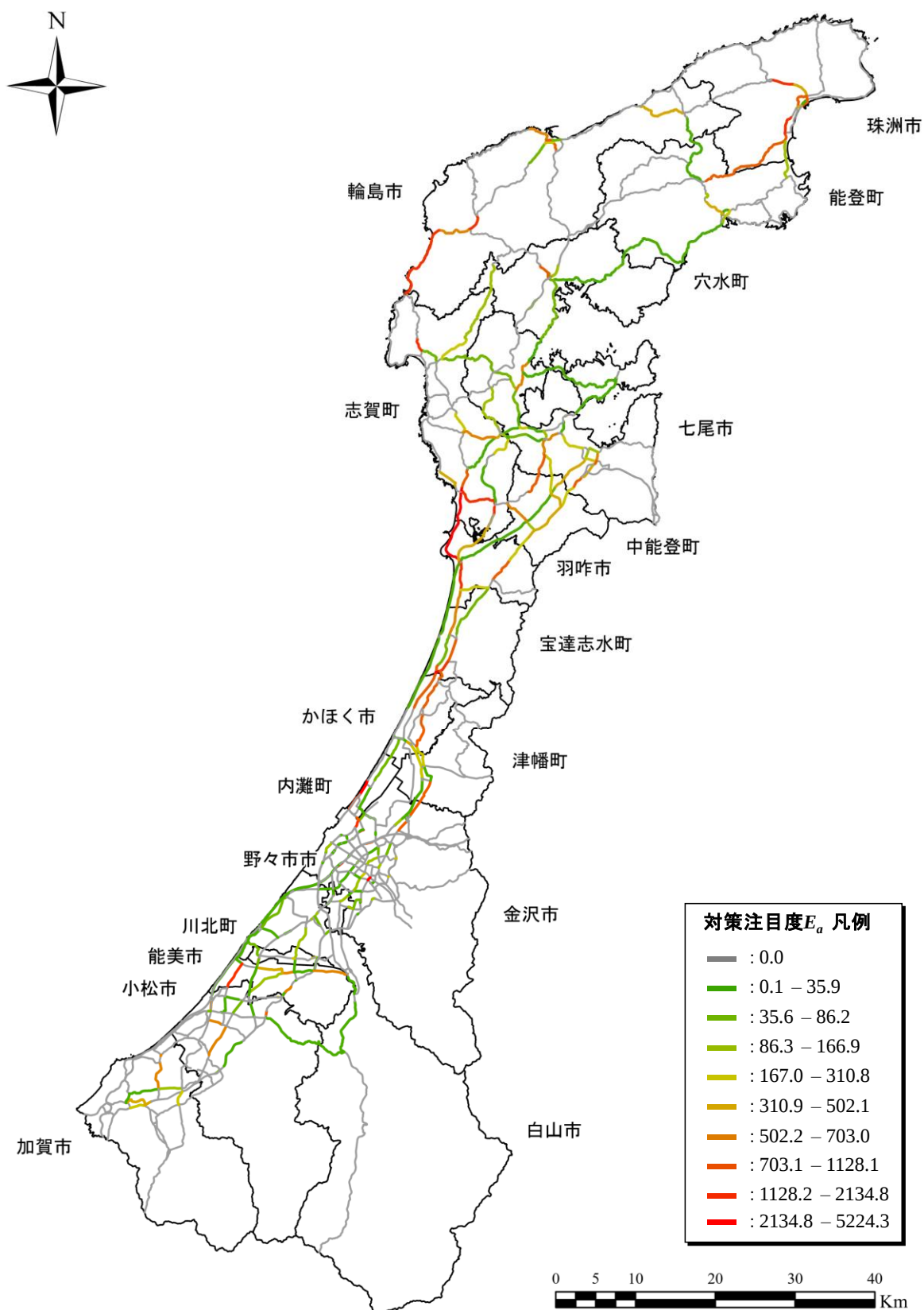


図-4.20 各リンクの対策注目度の空間分布

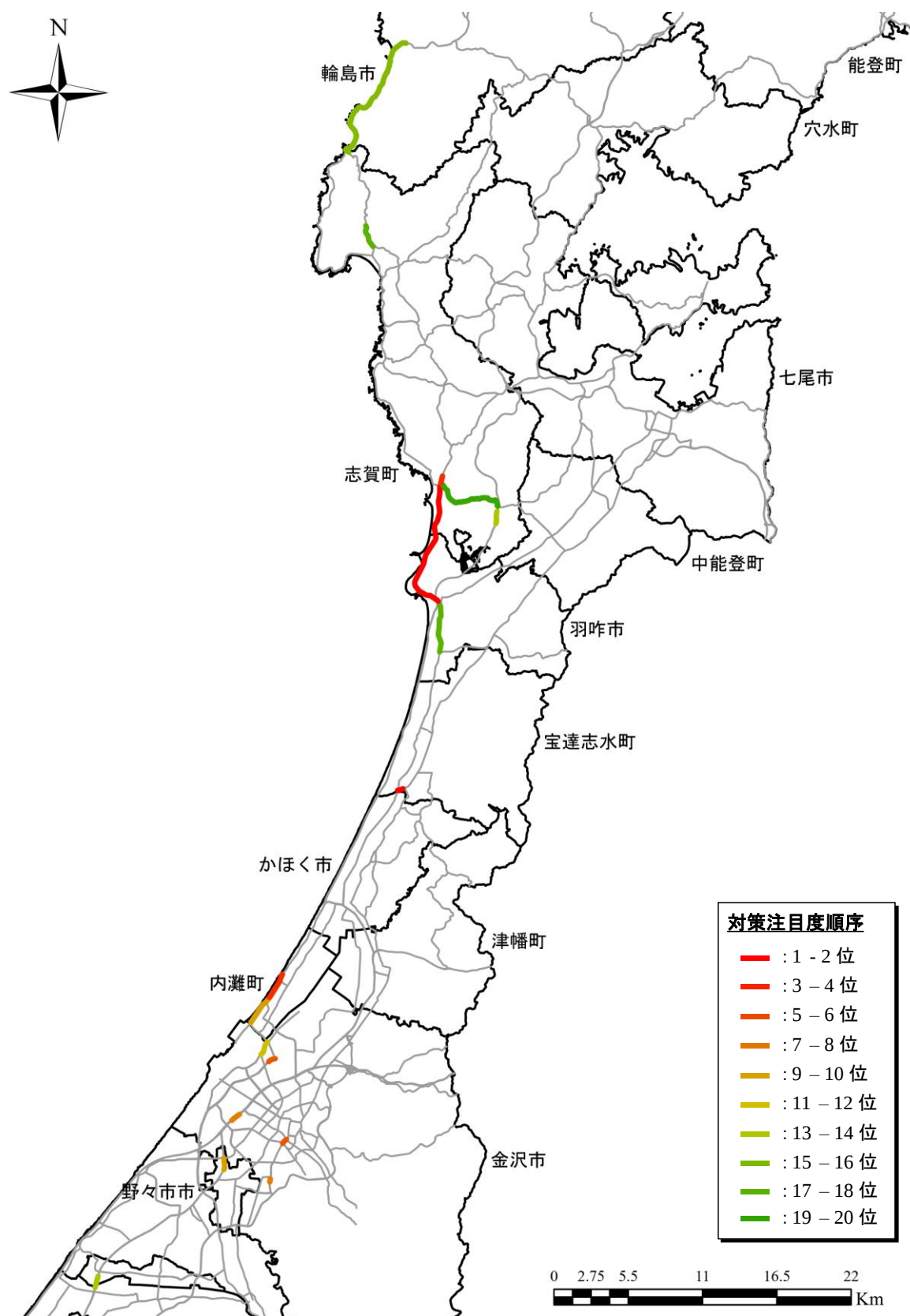


図-4.21 対策注目度上位20位までのリンクの空間分布

(2) 基礎手法との比較による評価結果の妥当性の検証

図-4.22に各リンクの対策注目度について、その評価値の変化率を示した。対策注目度が減少したリンクは青系統に、対策注目度が増加したリンクは赤系統に、対策注目度が変化しなかったリンクは灰色にそれぞれ着色した。また、基礎手法による分析では対策注目度が0だったが、本分析では対策注目度が0より大きくなったリンクは黄緑に着色した。

本分析では、経路距離が拠点ペア間の最短距離の1.5倍を超えるような第1経路では、累積災害危険箇所数が少ない経路でも棄却している。したがって、拠点ペアの分布に照らして、大きな迂回につながる位置にあるリンクで対策注目度が減少し、迂回を改善するような位置にあるリンクで対策注目度が増加する結果となれば、手法の設計思想を満足しており、妥当性が確保されていると評価できる。そこで、図-4.22に関してこのような視点での考察を行なう。

まず、対策注目度が減少したリンクについて考察する。このようなリンクは、能登半島外周部や加賀地方の山側のように、対象としたネットワークの外側に位置するものがほとんどである。また、図-4.2の拠点分布から分かるように、拠点の多くはネットワークの内側に存在している。したがって、一部の拠点ペアを除いて、外側のリンクを通過することは大きな迂回につながる。すなわち、経路距離を短くするためにはこれら外側のリンクを通過してはならない。以上より、対策注目度が減少したリンクについて、その結果は妥当なものと評価できる。

次に、対策注目度が増加したリンクについて考察する。このようなリンクの多くは、ネットワークの内側か、あるいは一部拠点ペアの最短経路付近に位置している。拠点の空間分布より、経路距離を短くするためにはネットワーク内側のリンクを通過する必要がある。以上より、対策注目度が増加したリンクについても、その結果は妥当なものと評価できる。

最後に、基礎手法による分析では対策注目度が0であり、本分析で対策注目度が0より大きくなったリンクについて考察する。このような結果を得るためには、これらリンクが、多くの拠点ペアの最短経路が通過するネットワークの内部か、一部拠点ペアの最短経路上に位置している必要がある。図-4.22より該当リンクは明らかにこれら条件を満足していることが分かる。したがって、これらリンクについてもその評価結果は妥当なものと評価できる。

次に、本分析での経路距離の傾向を図-4.23・図-4.24から確認する。第1経路では各拠点ペアの最短距離の1.5倍以上の経路は棄却されるため、基礎手法(図-4.16)と比較して長大な経路が排除されている。距離の短いリンクを第1経路が通過することで、第2経路の経路距離が増加すると予想したが、基礎手法(図-4.17)と比較してもそのような傾向は確認されない。

以上より、本提案手法の設計時点で目的とした災害対応の迅速性の視点が、 k 番目経路探索を援用した経路評価によって適切に導入されたことを確認できた。

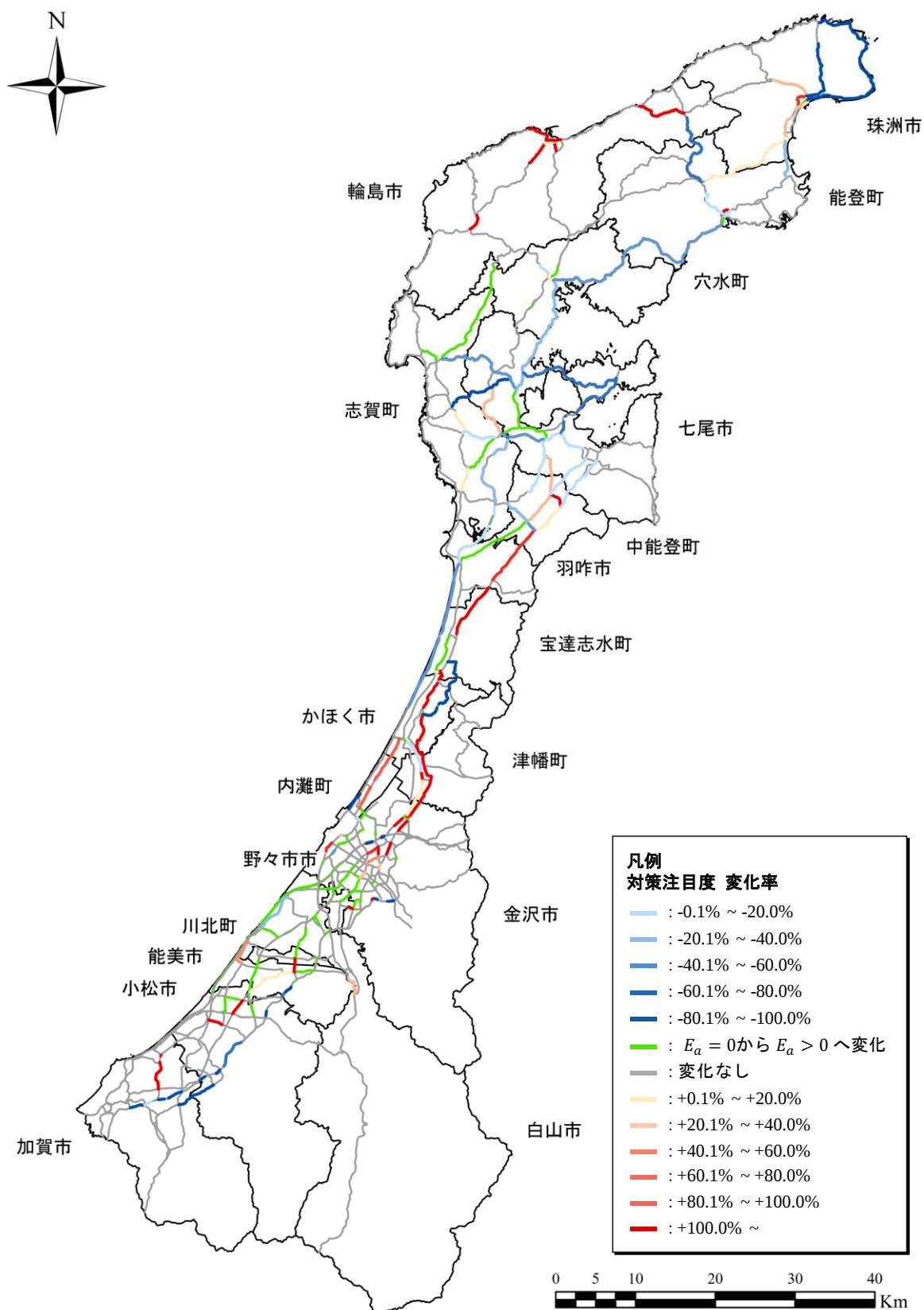


図-4.22 各リンクの対策注目度の変化率

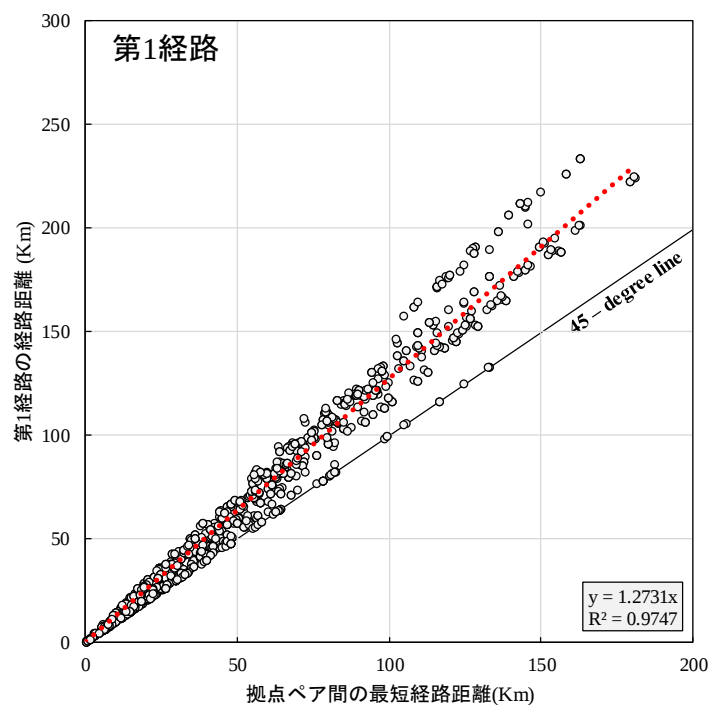


図-4.23 本分析における第1経路の経路距離と拠点ペア間の最短経路距離との関係性

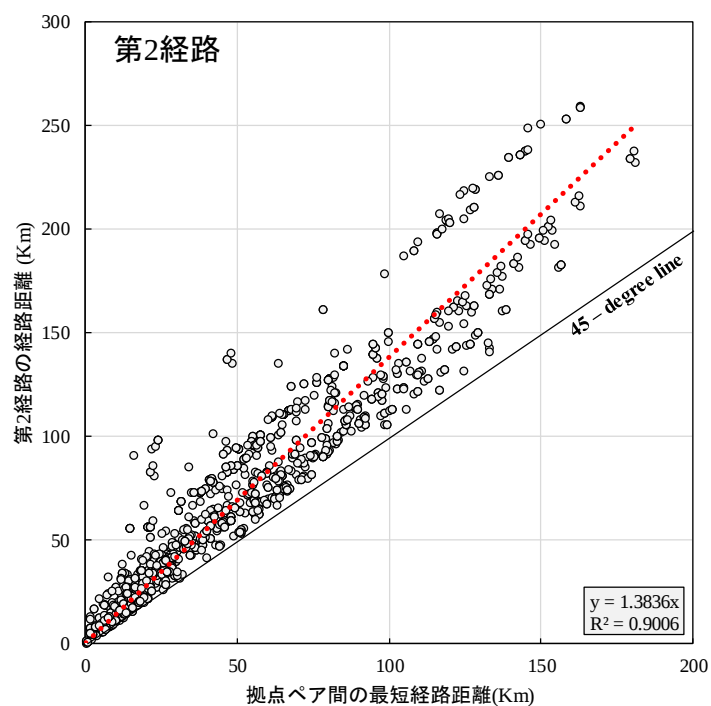


図-4.24 本分析における第2経路の経路距離と拠点ペア間の最短経路距離との関係性

4.4.2 経路特性に関する基礎手法との比較による提案手法の特性の分析

ここでは、本分析における各経路の累積災害危険箇所数について、基礎手法での分析結果からの変化を分析する。表-4.3 に基礎手法での分析と本分析における経路の平均累積災害危険箇所数とその標準偏差、平均変化率を示した。また、図-4.25 および図-4.26 に基礎手法での分析と本分析における経路の累積災害危険箇所数の関係性を散布図で示した。

まず、第1経路に着目する。手法の定義上、第1経路では累積災害危険箇所数については増加以外の変化は生じない。平均累積災害危険箇所数は4.66箇所から6.07箇所へ1.41箇所増加した。標準偏差も3.30箇所から6.87箇所へ3.57箇所増加した。平均変化率は35.9%であり、全体的にやや大きく累積災害危険箇所数が増加したことが分かる。図-4.25 より、累積災害危険箇所数が大きく増加する拠点ペアも散見される。これは、このような拠点ペアでは、許容可能距離を満足する経路には多数の災害危険箇所を含むものしか存在しないことを意味する。すなわち、災害対応の迅速性を確保するためには重点的な対策を要する拠点ペアである。

第2経路では平均累積災害危険箇所数は13.65箇所から9.20箇所減少し、標準偏差も13.71箇所から6.86箇所減少した。また、平均変化率は-7.9%であった。図-4.26 からは、累積災害危険箇所数が増加した拠点ペアに比べ減少した拠点ペアの方が、変化が大きいことが読み取れる。第1経路が距離は短いが災害危険箇所数が多いリンクを通過するようになった結果、第2経路で災害危険箇所数の少ないリンクを通過できるようになったことがこの理由として考えられる。

以上を整理すると、第1経路では対策を要する箇所は増大するが、第2経路まで含めて拠点ペア全体でみれば、対策を要する箇所は大きく変化しない可能性が示唆される。実際に、本研究の事例では、拠点ペア全体での平均累積災害危険箇所数は基礎手法での分析では183箇所であったのに対して本分析では15.3箇所であった。ただし、これは第2経路で災害対応の迅速性を考慮していない場合の結果である。本来の目的である災害対応の迅速性確保のためには第1経路への対策が必要であることを認識した上で結果を解釈する必要がある。

表-4.3 基礎手法と本手法における経路の平均累積災害危険箇所数と標準偏差

	平均累積通過災害危険箇所数		標準偏差		平均変化率	
	第1経路	第2経路	第1経路	第2経路	第1経路	第2経路
基礎手法	4.66	13.65	3.30	13.71	35.9%	-7.9%
本手法	6.07	9.20	6.87	6.86		

* 基礎手法での累積災害危険箇所数が0である拠点ペアは除外して集計

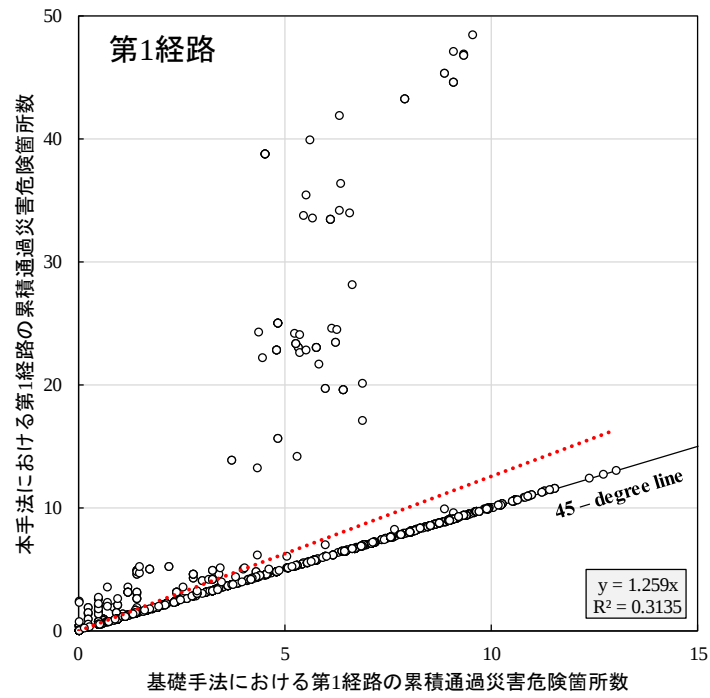


図-4.25 基礎手法と本手法における第1経路の累積災害危険箇所数の関係性

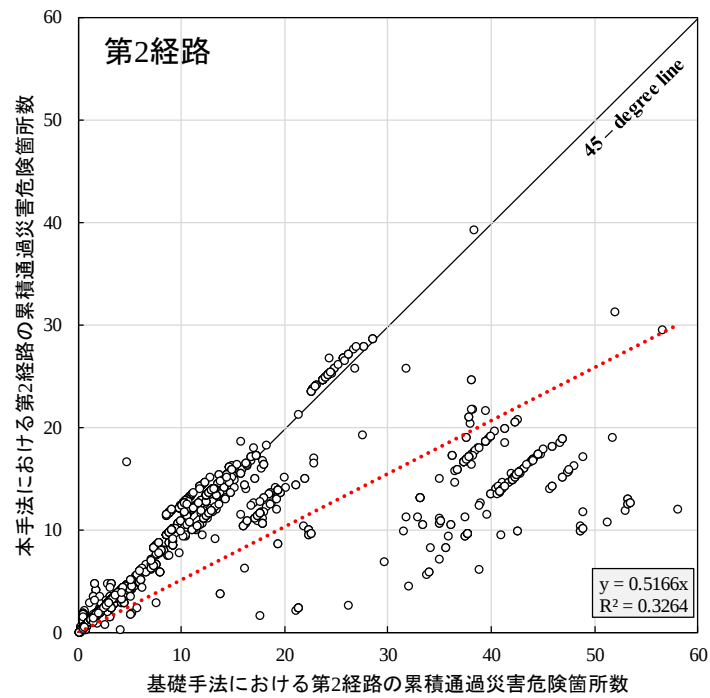


図-4.26 基礎手法と本手法における第2経路の累積災害危険箇所数の関係性

4.5 おわりに

本章では第3章で構築した2つの道路の災害リスク評価手法に関して、石川県の緊急輸送道路ネットワークと地域防災計画を対象としたケーススタディを実施した。その結果、いずれの手法についても提案手法の基本的な考え方を満足する妥当な結果を得ることができた。また提案手法の特性を把握するための分析を行い、それぞれ以下のような知見を得た。

4.5.1 基礎手法に関する知見

3.3節で構築した災害危険箇所数を指標とした道路の災害リスク評価手法に関して、①各拠点ペア間の経路を構成するリンクの特性に関する分析、②経路距離と累積災害危険箇所数に関する分析、③経路距離と最短経路距離に関する分析、④第2経路抽出の効果に関する分析の4つの分析を行い、各分析から以下のような知見を得た。

①の分析からは、危険リンクの経路通過率に着目することで、対策検討・立案のための基礎情報として、対策上の注目度が低いリンク、拠点ペア個別あるいは小数拠点ペアのグループ単位での対策効果が期待できるリンク、拠点ペア全体に共通して対策効果を期待できるリンクの3情報を獲得できることを示した。また、経路通過率をリンクの災害危険箇所数と関連付けることで、対策上の注目リンクを上記リンクから抽出する際の判断基準を示した。

②の分析からは、経路距離と累積災害危険箇所数との間には比例関係があり、傾きの傾向から経路をグルーピングできる可能性を示した。これには、グループごとの共通の対策箇所や課題の抽出、グループ間での対策の優先度や方針分けなどの検討材料としての活用可能性がある。

③の分析では、本ケーススタディの結果に対する経路距離と最短経路距離との関係性を整理した。これより、「第1経路と第2経路の経路距離はトレードオフの関係にある」ことを述べた。また、経路距離に関する分析を行なうことで、経路の長さや経路距離の偏りなどのチェックに活用可能であることを述べた。

④の分析からは、石川県のような道路ネットワークでは第2経路を抽出することで対策方針の期待通りの効果が得られることを確認した。一方、第2経路を考慮する場合としない場合とでは評価結果が大きく変動することから、対策方針次第で経路の扱いを慎重に検討する必要があることを指摘した。同様に、道路ネットワークの形状次第では期待した効果が得られないことも想定されることから、この点でも経路の扱いを慎重に検討する必要があることを指摘した。

4.5.2 経路距離を考慮した災害リスク評価手法に関する知見

3.6 節で構築した経路距離を考慮した災害危険箇所数を指標とした道路の災害リスク評価手法に関して、累積災害危険箇所数に関する基礎手法との比較を行い、提案手法の特性の把握を行った。その結果、以下のような特性が明らかとなった。

- 1) 第1経路について、基礎手法と比べて累積災害危険箇所数が大きく増加する拠点ペアが散見された。これは、このような拠点ペアでは、許容可能距離を満足する経路には多数の災害危険箇所を含むものしか存在しないことを意味する。すなわち、災害対応の迅速性を確保するためには重点的な対策を要する拠点ペアである。
- 2) 第2経路について、基礎手法と比べて、平均累積災害危険箇所数が減少する可能性があることを確認した。これより、第1経路では対策を要する箇所は増大するが、第2経路まで含めて拠点ペア全体でみれば、対策を要する箇所は大きく変化しない可能性が示唆される。ただし、これは第2経路で災害対応の迅速性を考慮していない場合の結果である。本来の目的である災害対応の迅速性確保のためには第1経路への対策が必要であることを認識した上で結果を解釈する必要がある。

第4章 参考文献

- 1) 石川県，石川県地域防災計画 地震災害対策編：
https://www.pref.ishikawa.lg.jp/bousai/bousai_g/bousaikeikaku/documents/06_01jishinn_zenntai.pdf (2019.12.27 閲覧)
- 2) 警察庁，焦点第281号「東日本大震災と警察」：
<https://www.npa.go.jp/archive/keibi/syouten/syouten281/pdf/ALL.pdf> (2019.12.27 閲覧)
- 3) 防災科学技術研究所，j-SHIS 地震ハザードステーション：<http://www.j-shis.bosai.go.jp/>
(2019.12.27 閲覧)
- 4) 日本デジタル道路地図協会，DRM データベースの紹介：<https://www.drm.jp/database/>
(2019.12.27 閲覧)
- 5) 小川福嗣，近田康夫：橋梁の劣化損傷を考慮した災害時の緊急輸送道路接続性に関する一考察，土木学会論文集 F4（建設マネジメント），Vol.73，No.1，pp.19-25，2017.

第 5 章 道路防災対策の検討・立案のための活用メニューの提案とその事例分析

5.1 はじめに

第 3 章と第 4 章では、災害危険箇所数を指標とした災害リスク評価手法を構築し、石川県緊急輸送道路ネットワークを対象としたケーススタディから手法の妥当性や特性を確認した。しかし、道路防災対策の検討・立案のための活用方法は示されていない。そこで、本章では提案手法の活用メニューを提案する。具体的には、①対策注目度の評価値順の対策箇所設定とその効果確認、②対策注目度上位リンクの複数比較による検討材料の拡充、③高災害リスク拠点ペアの抽出と個別対策の検討の 3 メニューを提案するとともに、分析事例もあわせて示す。

5.2 石川県緊急輸送道路ネットワークを対象とした事例分析の方法

事例分析では、各活用メニューにおける分析手順の例示を目的に、石川県緊急輸送道路ネットワークを対象とした分析を行なう。ここで、本研究で提案した 2 つの手法では同じ条件設定下でも異なる結果となるが、分析手順は共通している。これを踏まえ、基礎手法である第 3 章のケーススタディと同様の条件設定を用いた分析を行なう。すなわち、対象道路ネットワーク・拠点ペア・想定自然災害・災害危険箇所は表-5.1 に示す条件とした。

表-5.1 事例分析における条件設定の一覧表

条件名	条件概要	対応図番号
道路ネットワーク	石川県緊急輸送道路ネットワーク	図-4.2
拠点ペア	・ 県庁と市町村役場 ・ 県庁・市町村役場と警察本部・警察署 ・ 県庁・市町村役場と消防本部・消防署	図-4.2
想定自然災害	ハザード：地震災害 ハザード規模：50 年間超過確率 2%以上となる地震動	図-4.3
災害危険箇所	・ 建物倒壊に伴う道路閉塞を想定した災害危険箇所 ・ 橋梁の落橋・損傷を想定した災害危険箇所 ・ 斜面崩壊を想定した災害危険箇所	-

5.3 対策注目度の評価値順の対策箇所設定とその効果確認

5.3.1 手法の活用フロー

提案手法の最もシンプルな活用方法が、リンクの評価値である対策注目度の順に対策箇所設定である。本メニューの道路防災対策上の位置付けは「共通するリスクに対策して道路ネットワークの接続性を向上させようとした時、高い効果が期待できる対策箇所とその効果の確認」である。具体的には、「N本の道路を対策した場合に得られる拠点ペア間の災害リスクの低減効果」の確認や、「拠点間ペアの災害リスクをある水準まで低減しようとした場合にどの程度対策を進める必要があるか」を確認するための資料として活用されることを想定している。

図-5.1に本メニューにおける手法の活用フローを示した。①対策注目度に応じて対策リンクを選定する、②そのリンクに対策したネットワークで再度評価を行なう、③災害リスクの低減効果（全経路の災害リスクの平均改善率）を算出する、④対策水準についての方針に応じた終了判定の4フローで構成される。なお、各経路の災害リスクの改善率は式(5.1)から算出する。

$$r_i^{imp} = 1 - \frac{N_{i,s}^{TW}}{N_{i,0}^{TW}} \quad (5.1)$$

ここで、

$N_{i,s}^{TW}$ ：対策ステップ s 時点における経路 i における災害リスク（累積災害危険箇所数）

$N_{i,0}^{TW}$ ：現状道路ネットワークにおける経路 i における災害リスク（累積災害危険箇所数）

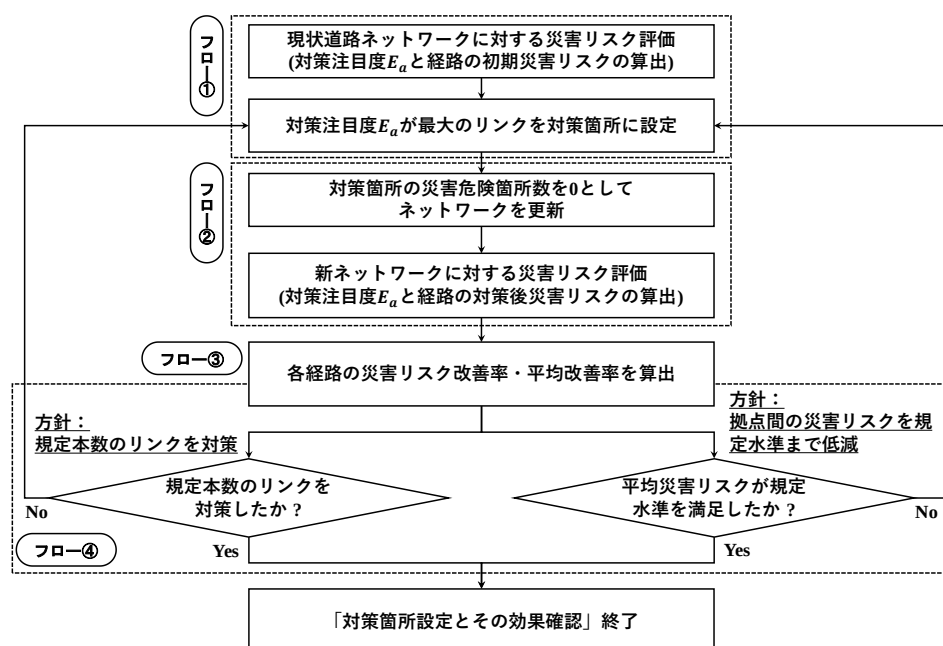


図-5.1 「対策箇所設定とその効果確認」手法活用フロー

5.3.2 事例分析の結果

ここでは、対策水準に関する方針として「規定本数のリンクを対策」を想定し、合計で 30 リンクに対策することとした。図-5.2 に各ステップでの経路の災害リスクの平均改善率を示す。また図-5.3 には各ステップで対策箇所に選定されたリンクの空間分布を示す。図-5.2 より、概ね一定のペースで経路の災害リスクが改善されていく状況が確認できる。経路の平均改善率は最終的に 30%を超える結果となった。図-5.3 からは、ケーススタディでも指摘したような、「ネットワークの構造上経路が集中しやすい区間」である石川県中央部から志賀町の範囲で、早い段階で対策箇所に選定されるリンクが多く出現していることが確認できる。

本分析では一定ペースで経路の状況が改善されていくことが確認されたが、対策が進むにつれて経路全体に共通するようなリンクは減少していくことが予想される。このため改善率の上昇ペースが落ち込むステップが途中で現れると推測される。このようなステップに到達した段階で、拠点ペア個別に対策を検討する方針への転換を検討することも考えられるだろう。

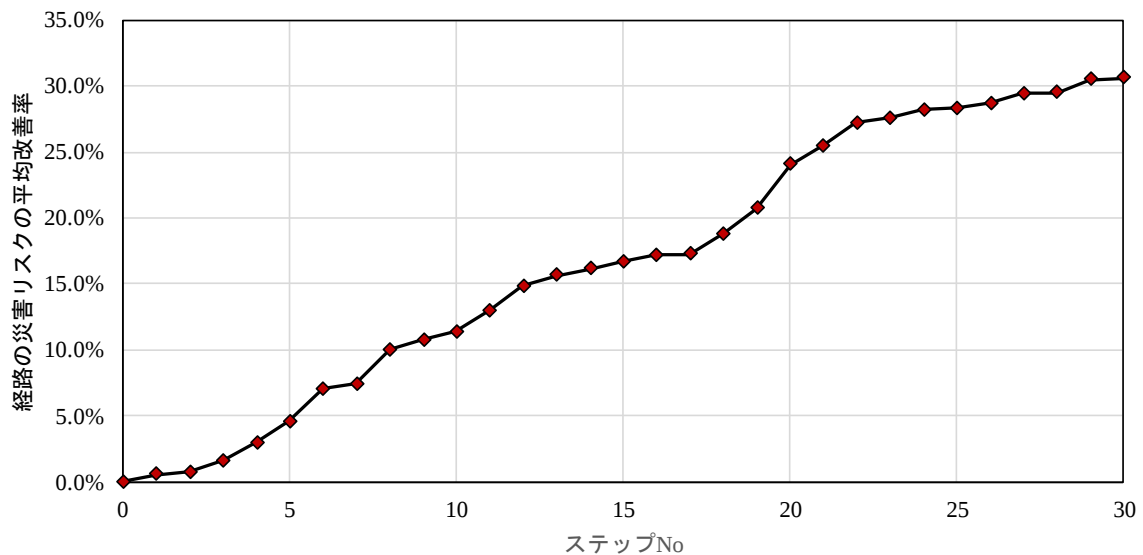


図-5.2 各対策ステップにおける経路の災害リスクの平均改善率

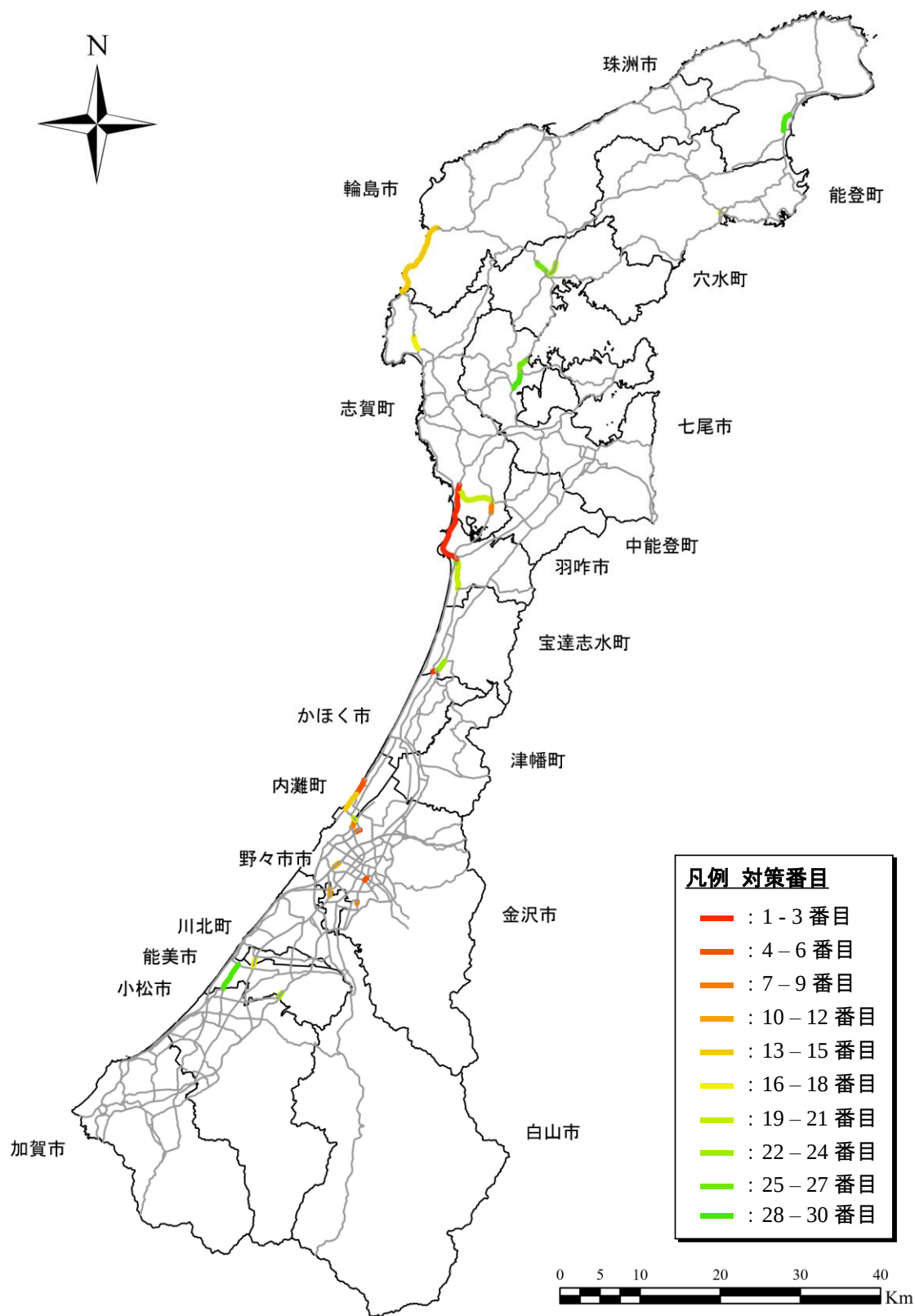


図-5.3 各対策ステップにおける対策リンクの空間分布

5.4 対策注目度上位リンクの比較による検討材料の拡充

5.4.1 手法の活用フロー

対策費用や拠点ペアごとの重要度など、災害リスク評価では明示的に扱われないが、対策箇所を検討する際に分析者が考慮に含める要素があることが想定される。そこで、対策注目度を検討材料の 1 つとして活用することも考えられる。このような活用メニューとして、現状ネットワークにおける対策注目度上位リンクの空間分布や、各リンクを対策した場合に次に対策注目度が上位となるリンクの空間分布を比較することで検討材料の拡充を図る方法を提案する。本メニューは対策箇所選定のための検討材料の拡充を目的に活用されることを想定している。

図-5.4 に本メニューでの手法の活用フローを示した。まず、現状の道路ネットワークでの対策注目度を参考に、「上位 N 本（上位 N%）のリンク」などの基準を設けて対策候補リンクを選定する。次に、各対策候補リンクに対策してネットワークで災害リスク評価を行う。最後に、得られた対策注目度を基に次ステップでの対策候補リンクをリストアップする。ここから得られる情報を他の検討材料と組み合わせ、対策箇所を検討するという流れの活用方法である。

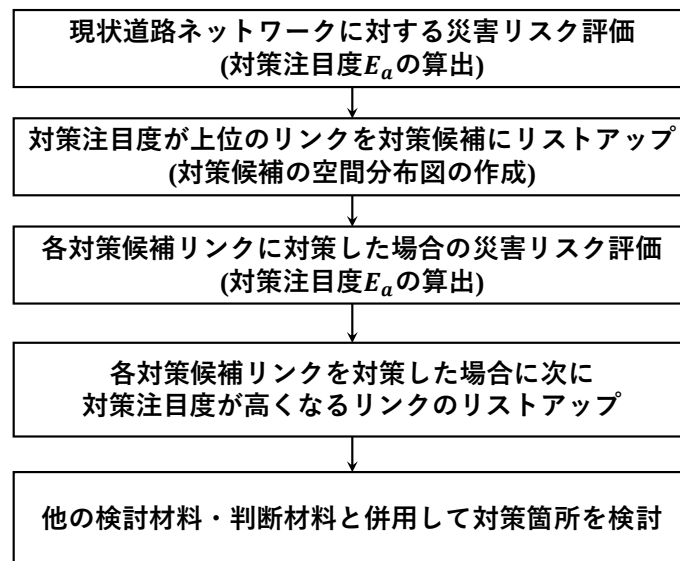


図-5.4 「対策注目度上位リンクの比較による検討材料の拡充」手法活用フロー

5.4.2 事例分析の結果

ここでは対策注目度上位 10 リンクを対策候補として抽出する。まず、現状ネットワークでの対策注目度上位 10 リンク（対策候補リンク）の空間分布を図- 5.5 に示す。これら各候補リンクを対策した時、次に対策注目度が上位 10 となるリンク（次ステップでの対策候補リンク）の空間分布を図- 5.6 から図- 5.8 に示す。これらより、最初に対策するリンクが異なると、その後の対策注目度に変化が生じることが観察される。本分析事例では、対策候補リンク自体は共通していてその対策注目度の順序が異なっている場合が多い。このような場合には、対策候補となるリンクの内訳が異なる結果が得られるまで同様の分析を繰り返すことも有効であると考えられる。以上のような情報と、分析者が持つ他の検討材料を組み合わせることで、地域ごとの特性や拠点ペア個別の事情を踏まえた対策の検討・立案の一助となることが期待される。

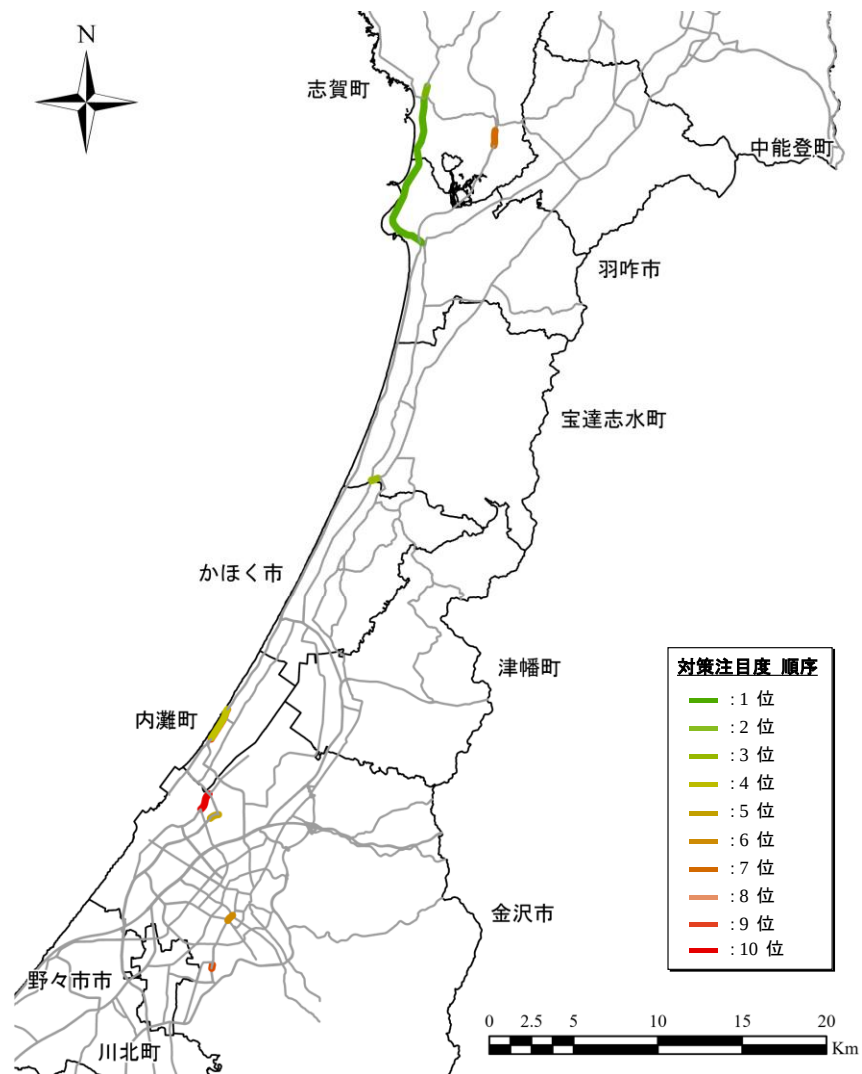


図-5.5 対策注目度上位 10 リンク（対策候補リンク）の空間分布図

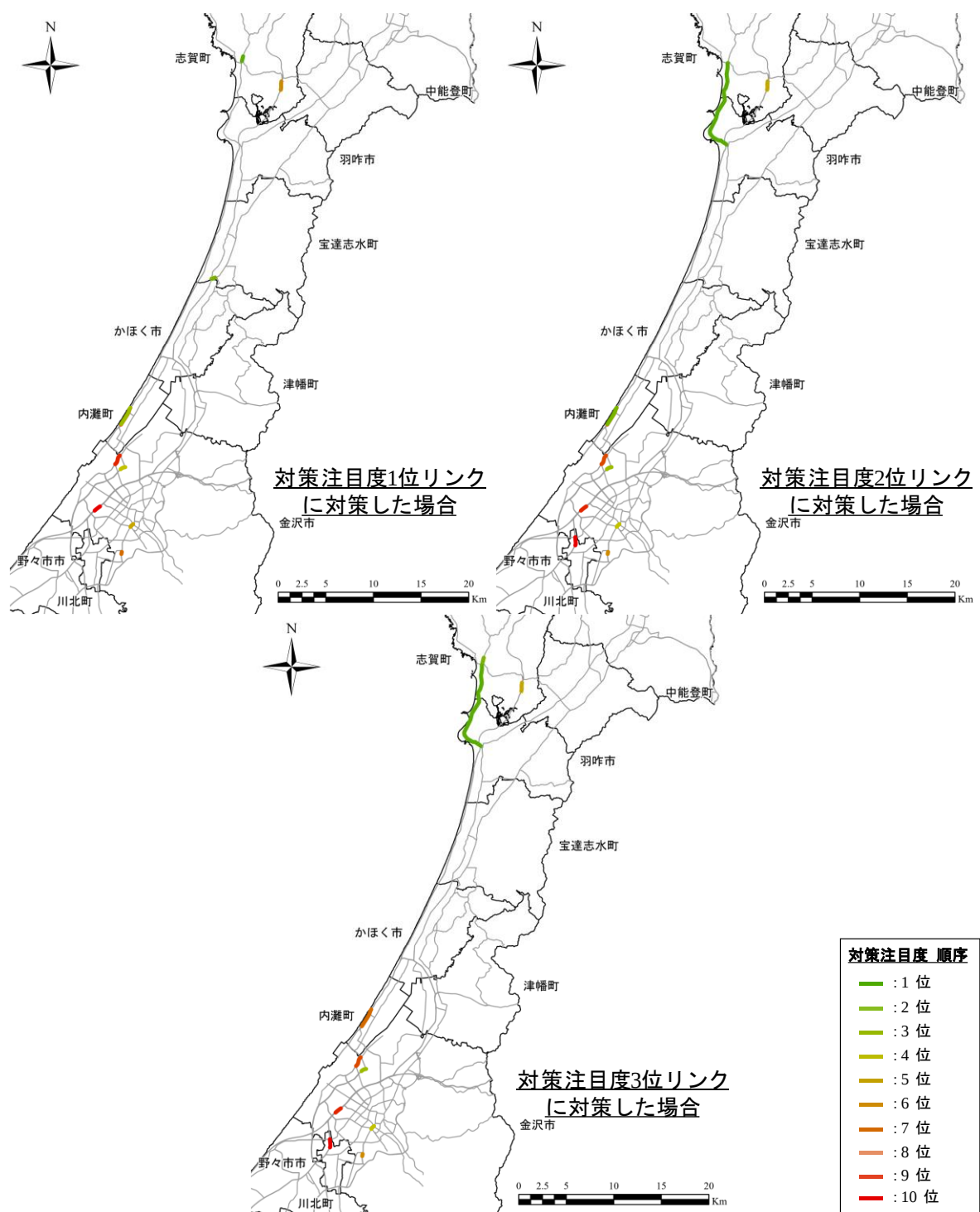


図-5.6 対策注目度 1～3 位のリンクの次ステップにおける対策候補リンクの空間分布図

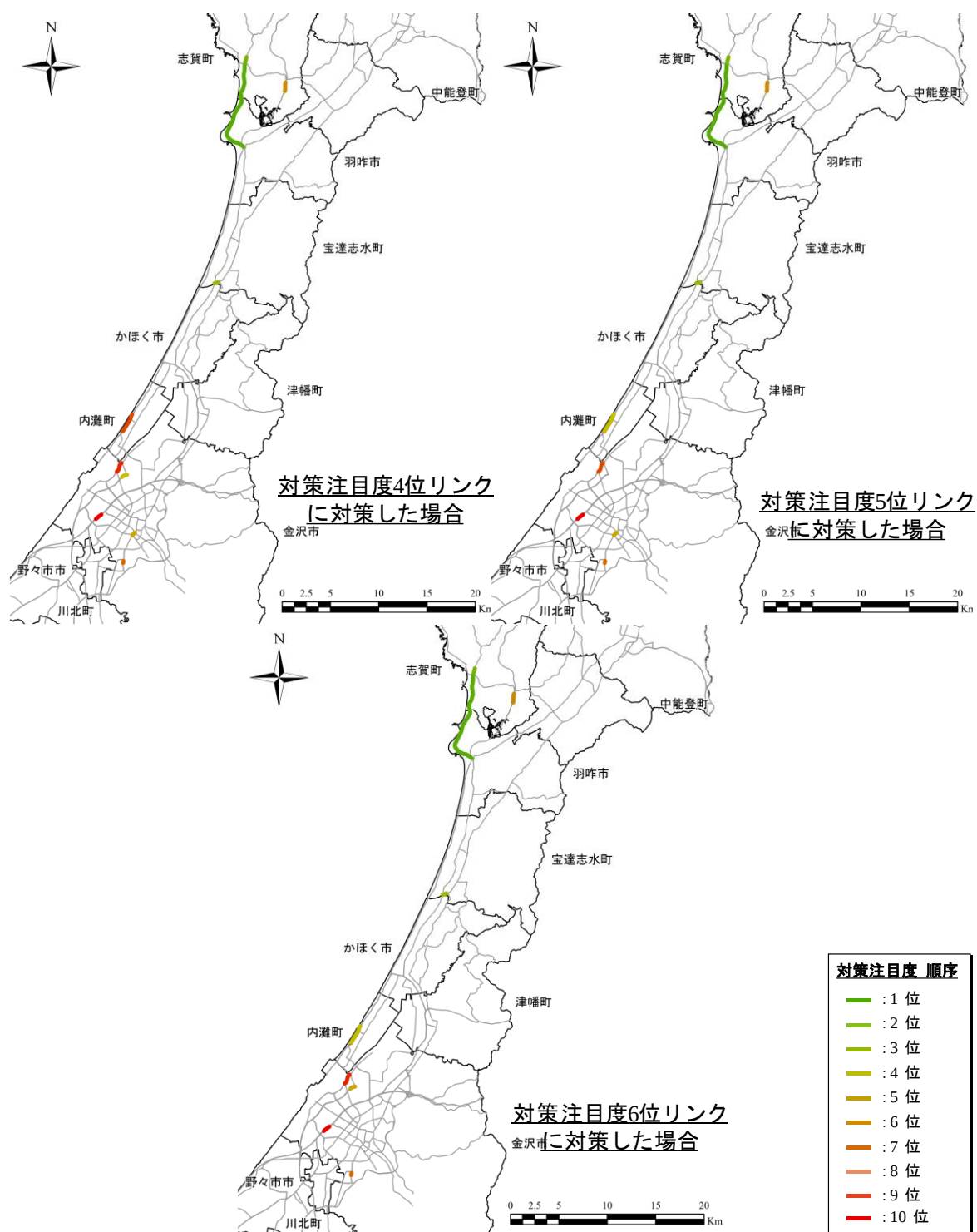


図-5.7 対策注目度 4～6 位のリンクの次ステップにおける対策候補リンクの空間分布図

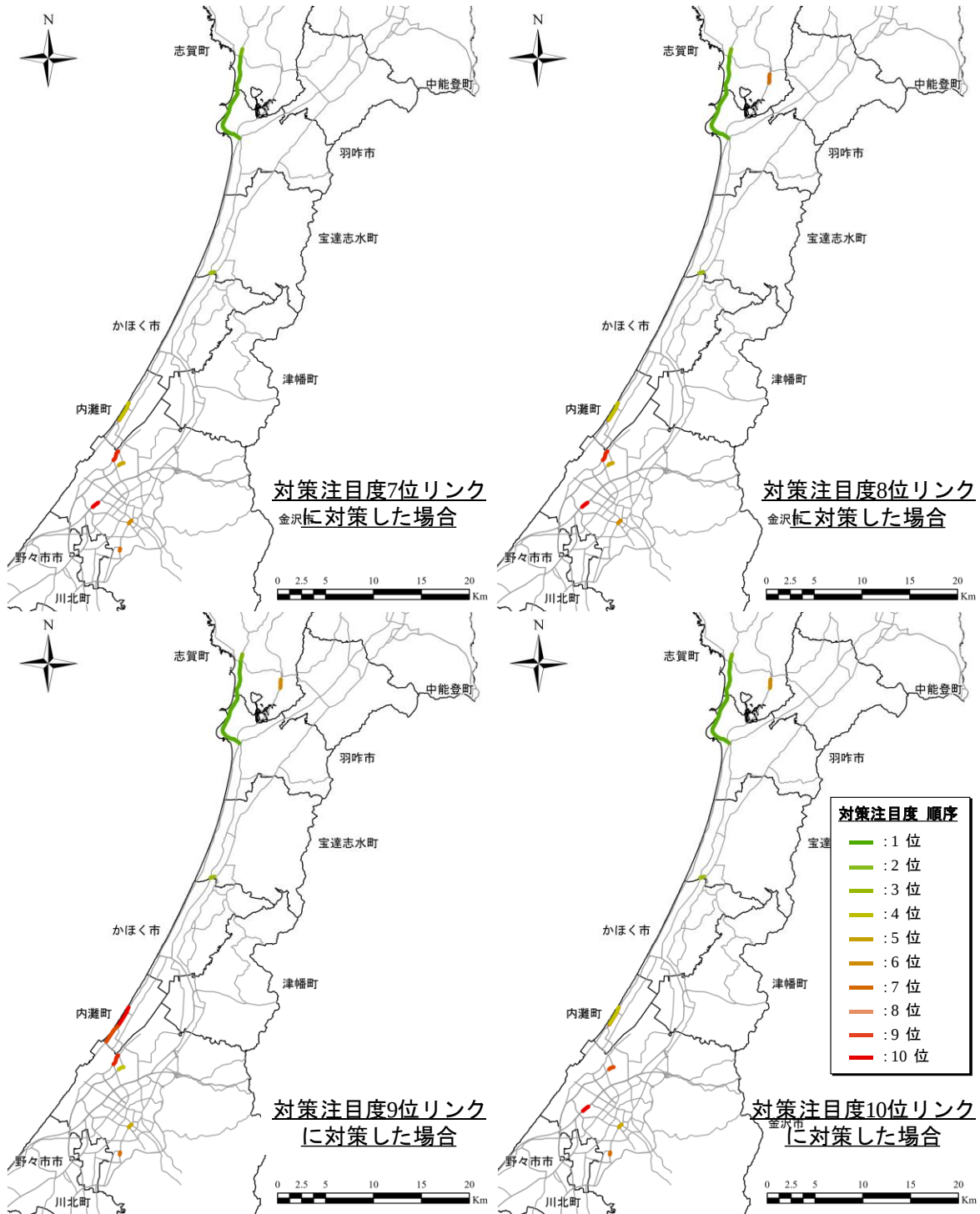


図-5.8 対策注目度7～10位のリンクの次ステップにおける対策候補リンクの空間分布図

5.5 高災害リスク拠点ペアの抽出と個別対策の検討

5.5.1 手法の活用フロー

これまでの活用メニューは、全体に共通する災害リスクへの対策を想定していた。一方で、他の拠点ペアに比べて災害リスクが高く、個別での対策が望まれるような拠点ペアが存在する場合も考えられる。そこで、このような拠点ペアを抽出し、個別対策を実施する上で注目すべきリンクを提示することを目的とした活用メニューを提案する。本メニューは拠点ペア個別の状況把握による個別対策の必要性判断および対策箇所の検討に活用されることを想定している。

図-5.9 に手法の活用フローを示す。個別対策が望まれるほど災害リスクが高い拠点ペアの抽出が目的であるため、特に第 1 経路に着目する。これは、各拠点ペアでの最小災害リスクが他より高い拠点ペアを抽出することを意図している。他の拠点ペアと比べて災害リスクが高いかどうかの判断基準は、分析者の対策方針に委ねられるが、例としては「累積通過災害危険箇所数が下位 $x\%$ 」、「全拠点ペアの平均累積災害危険箇所数から標準偏差以上離れ拠点ペア」などが挙げられよう。また、仮に拠点ペア間の累積通過災害危険箇所数に目標水準が定められる場合、それに従うという方針もあり得る。手法活用の流れは以下の通りである。①現状ネットワークでの災害リスクの評価、②高災害リスク拠点ペアの抽出、③それら拠点ペアの第 1 経路の可視化の順に進め、対策方針に応じて、着目するリンクの視点を以下のように分ける。④-a 単独拠点ペアに着目する場合、その経路上で最も災害危険箇所数の多いリンクを抽出、④-b 複数拠点ペアに着目する場合、対象拠点ペアの共通区間から災害危険箇所数の多いリンクを抽出、最後に、⑤全体での対策注目度の高いリンクとの比較による個別対策の必要性を検討する。

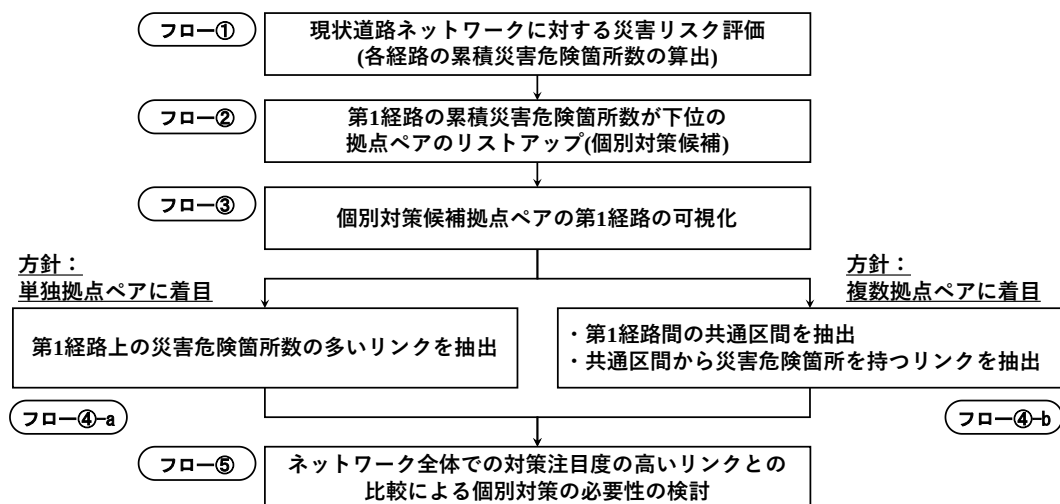


図-5.9 「高災害リスク拠点ペアの抽出と個別対策の検討」手法活用フロー

5.5.2 事例分析の結果

ここでは累積災害危険箇所数が下位 10 位までの拠点ペアという基準を設ける。現状道路ネットワークの災害リスク評価結果から抽出された対象拠点ペアの第 1 経路を図-5.10 に示す。本分析で抽出された拠点ペアは、すべて対象拠点ペアの中でもペア間の距離がそもそも離れているものとなった。これは、一般的には距離が離れているほど途中で通過せざるを得ない災害危険箇所数も増加すると考えられることから説明できる。これを踏まえると、累積災害危険箇所数と経路距離との比率をペア抽出の基準とする方針も考えられる。これに対して、ここでのペア設定の基準は、累積災害危険箇所の絶対数が災害時における経路の接続性を左右するという考えに基づく。すなわち、本メニューは、「災害リスクが高い拠点ペア」の判断基準を対策の方針に応じて明確に規定した上で活用されることを想定している。

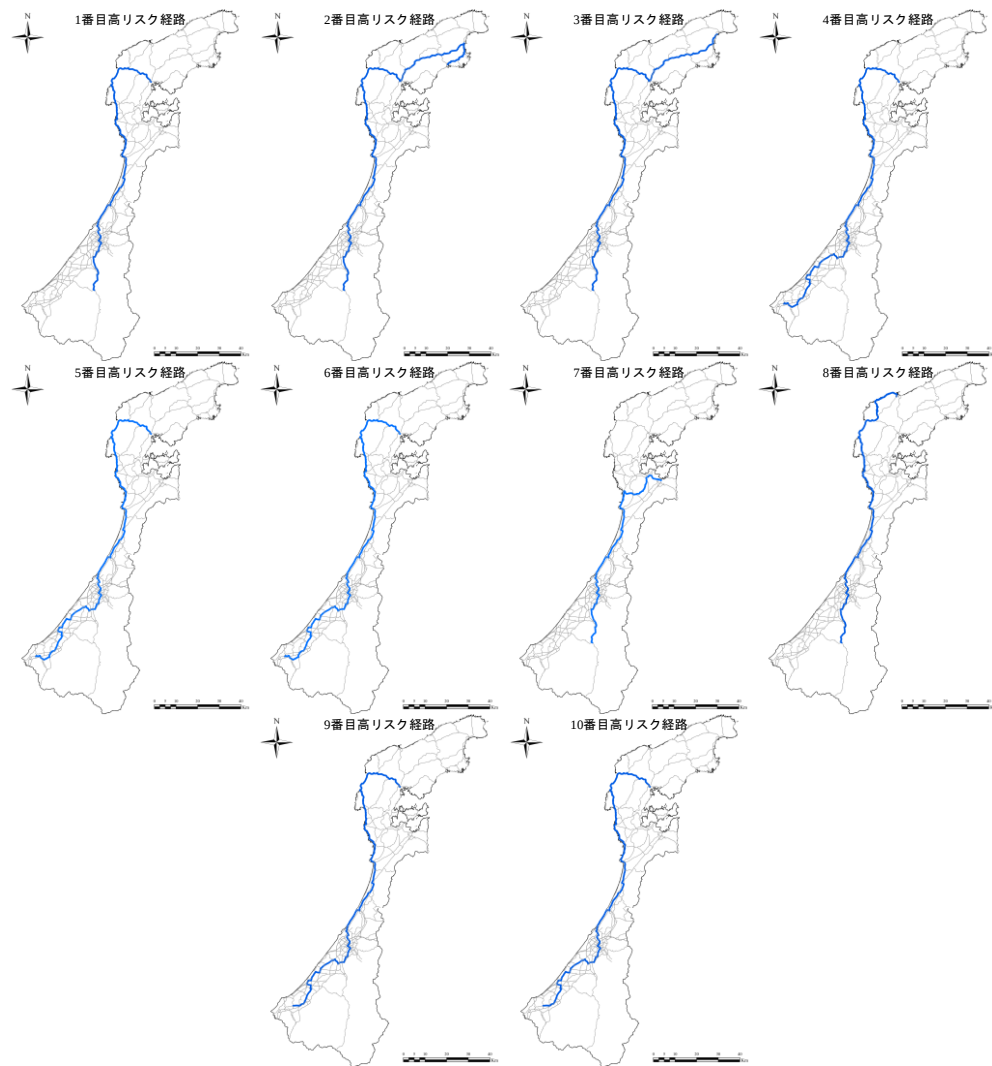


図-5.10 累積通過災害危険箇所数が下位 10 である拠点ペアの第 1 経路

図-5.10 からは、抽出された拠点ペアの第 1 経路は共通区間が多いことが読み取れる。ここでは図-5.9 に示したフローの内、複数拠点ペアに着目することを方針とした場合を想定して考察を示す。図-5.11 にリンク別の対象拠点ペアの第 1 経路の通過本数を示す。ここで通過本数の多いリンクの多くは、ネットワーク全体で見た場合に対策注目度が高いリンクと共通している（図-5.3 参照）。すなわち、ネットワーク全体への対策の一貫でこれら拠点ペアへも対策効果が及ぶことから、個別対策を実施する必要はないと結論付けられる。

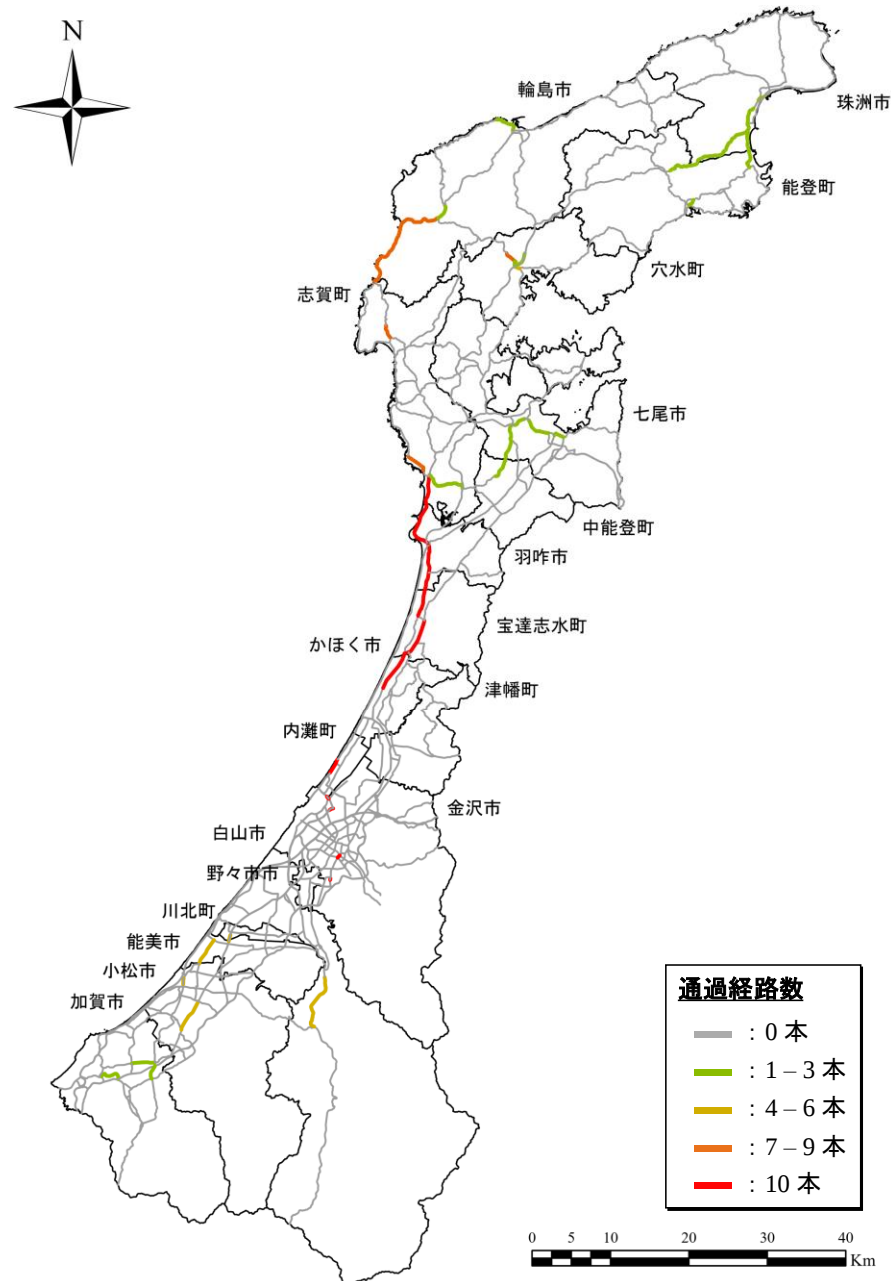


図-5.11 災害危険箇所を有する道路リンクにおける 10 拠点ペアの第 1 経路の通過本数

5.6 おわりに

本章では本研究で提案した 2 つの道路の災害リスク評価手法を道路防災対策の検討・立案へ適用するための活用メニューについて、以下の 3 メニューを提案した。また石川県の緊急輸送道路ネットワークを対象とした事例分析によってその活用手順を示した。

1) 対策注目度の評価値順の対策箇所設定とその効果確認

リンクの評価値として得られる対策注目度の順に対策箇所を設定するメニューである。本メニューは「N 本の道路を対策した場合に得られる拠点ペア間の災害リスクの低減効果」の確認や「拠点ペア間の災害リスクをある水準まで低減しようとした場合にどの程度対策を進める必要があるか」を確認するための資料として活用されることを想定している。

2) 対策注目度上位リンクの比較による検討材料の拡充

対策の検討・立案の際に、対策費用や拠点ペアごとの重要度など、災害リスク評価で扱われていない要素を分析者が考慮することも考えられる。そこで、対策注目度を検討材料の 1 つとして位置づけ、現状ネットワークにおける対策注目度上位リンクの空間分布や、各リンクを対策した場合に次に対策注目度が上位となるリンクの空間分布を比較することで検討材料の拡充を図るメニューである。本メニューは対策箇所選定のための検討材料の拡充を目的として活用されることを想定している。

3) 高災害リスク拠点ペアの抽出と個別対策の検討

他の拠点ペアに比べて災害リスクが高く、個別での対策が望まれるような拠点ペアを抽出し、個別対策を実施する上で注目すべきリンクを提示することを目的としたメニューである。本メニューは拠点ペア個別の状況把握による個別対策の必要性判断および対策箇所の検討に活用されることを想定している。

第 6 章 結論と今後の課題

6.1 本研究の結論

平成 28 年熊本地震での道路被害を踏まえて、災害時を想定した道路ネットワークの評価手法の深度化が課題として指摘されている。道路防災対策には様々な方針を立てうる。そして、対策を検討する際にはその対策方針に合致した評価手法が選択される必要がある。したがって、対策手法の深度化は 1 つの優れた手法を開発することではなく、複数の手法が相互補完的に活用されることを想定して進める必要がある。また、近年の自然災害での教訓から、幹線道路ネットワークの戦略的かつ効果的な強化や道路の被災リスクに着目した対策箇所の検討など、評価手法の深度化の方向性の 1 つとして、これまでにない対策方針を適用していくことの必要性も指摘されている。こうした背景を踏まえて、本研究では「対策方針に関する新たな視点を持つ手法の開発」というアプローチで評価手法の深度化に取り組んだ。具体的には対策の視点として道路沿道まで含めた多様な道路被害のリスクに着目し、これを実現するために災害危険箇所数という評価指標を提案した。さらに本指標を基にした道路の災害リスク評価手法を構築し、対策の検討・立案のための手法の活用メニューも提示した。以下に本研究の成果を要約する。

第 2 章「既往研究の整理および本研究の位置付け」では、既往研究を、連結信頼性、道路ネットワークの脆弱性評価、道路ネットワークの幾何的構造に基づく評価、最適化手法等に基づく最適対策戦略の 4 つの視点でレビューし、対策方針として道路沿道まで含めた多様な道路被害のリスクに着目した評価手法はこれまでにないことを示した。これより、道路の被災リスクを表現するための災害危険箇所数指標の提案とこれに基づく評価手法を開発することで、対策方針の異なる手法の相互補完的活用プロセスの充実化を目指すものとして本研究を位置づけた。

第 3 章「災害危険箇所数を指標とした道路の災害リスク評価手法の構築」では、「共通するリスクへの対策による道路ネットワークの接続性向上」を対策方針に掲げた災害危険箇所数を指標とする 2 つの災害リスク評価手法を構築した。1 つは災害対応の実施可能性のうち「対応実施の確実性」に着目した手法（災害危険箇所数を指標とした道路の災害リスク評価手法）であり、もう一方は「対応実施の確実性」に加えて「対応の迅速性」にも着目した手法（経路距離を考慮した災害危険箇所数を指標とした道路の災害リスク評価手法）である。本章ではこれら 2 手法をそれぞれ単純仮想ネットワークに適用し、提案手法の挙動確認を行なうとともに、提案手法による評価の全体像を解説した。

第4章「現実道路ネットワークへの災害危険箇所数を指標とした道路の災害リスク評価手法の適用」では、第3章で構築した2つの道路の災害リスク評価手法に関して、石川県の緊急輸送道路ネットワークと地域防災計画を対象としたケーススタディを実施した。その結果、いずれの手法についても提案手法の基本的な考え方を満足する妥当な結果を得ることができた。また、提案手法の特性を把握するための分析を行い、それぞれ以下のような知見を得た。

・「災害危険箇所数を指標とした道路の災害リスク評価手法」について

- 1) 危険リンクの経路通過率に着目することで、対策上の注目度が低いリンク、拠点ペア個別あるいは小数拠点ペアのグループ単位での対策効果が期待できるリンク、拠点ペア全体に共通して対策効果を期待できるリンクの3情報を対策検討の基礎情報として獲得できる。
- 2) 経路距離と累積災害危険箇所数との関係性から経路をグルーピングでき、グループごとの共通の対策箇所や課題の抽出、対策の優先度や方針分けなどの検討材料になりうる。
- 3) 第1経路と第2経路の経路距離はトレードオフの関係にある。
- 4) 対策方針や道路ネットワークの形状次第で第2経路の扱いを慎重に検討する必要がある。

・「経路距離を考慮した災害危険箇所数を指標とした道路の災害リスク評価手法」について

- 5) 累積災害危険箇所が大きく増加する拠点ペアでは災害対応の迅速性を確保するために重点的な対策を要することを明らかにした。
- 6) 第1経路では対策を要する箇所は増大するが、第2経路まで含めて拠点ペア全体でみれば、対策を要する箇所は大きく変化しない可能性を示した。

第5章「道路防災対策の検討・立案のための活用メニューの提案とその事例分析」では、構築した道路の災害リスク評価手法を道路防災対策の検討・立案へ適用するための活用メニューとして、①対策注目度の評価値順の対策箇所設定とその効果確認、②対策注目度上位リンクの比較による検討材料の拡充、③高災害リスク拠点ペアの抽出と個別対策の検討の3メニューを提案した。また、実際の道路ネットワークを対象とした事例分析からその活用手順を示した。

以上のように、本研究では道路沿道まで含めた多様な道路被害のリスクに着目して、「共通のリスクへの対策による道路ネットワークの接続性向上」という対策方針をもつ道路の災害リスク評価手法を構築し、その妥当性や特性の検証を行い、活用メニューの提案まで行った。災害時を想定した道路ネットワークの評価手法はこれまでに多数提案されているが、近年の自然災害での教訓を基に必要性が指摘された「道路沿道まで含めた多様な道路被害のリスクに着目した対策検討」という対策方針に対応できる手法はない。このような中で、この対策方針を適用可能な手法を構築し、活用メニューを提案した本研究の意義は少なくないものと考ええる。

6.2 提案した道路の災害リスク評価手法の適用条件

道路防災対策をどのような対策方針で進めていくべきと考えて提案されたかによって、災害時を想定した道路ネットワークの評価手法はそのフレームワークが大きく異なる。このため、どのような対策方針下で適用されるべき手法なのか正しく理解した上で適用する手法が選択される必要がある。このような手法選択に寄与する情報の提示を目的として、本節では本研究で構築した道路の災害リスク評価について、適用を想定した道路防災対策の方針の視点から本手法の適用条件を整理する。図-6.1に、本提案手法の適用条件のチェックシートを示した。ここに示した方針全てに該当する方針での道路防災対策の実施を想定している場合に限り本提案手法の適用が可能である。また、他の手法との比較や、対策方針を定めるための予備分析等への活用を想定している場合は、ここに示した方針全てに賛同できる場合に適用可能である。

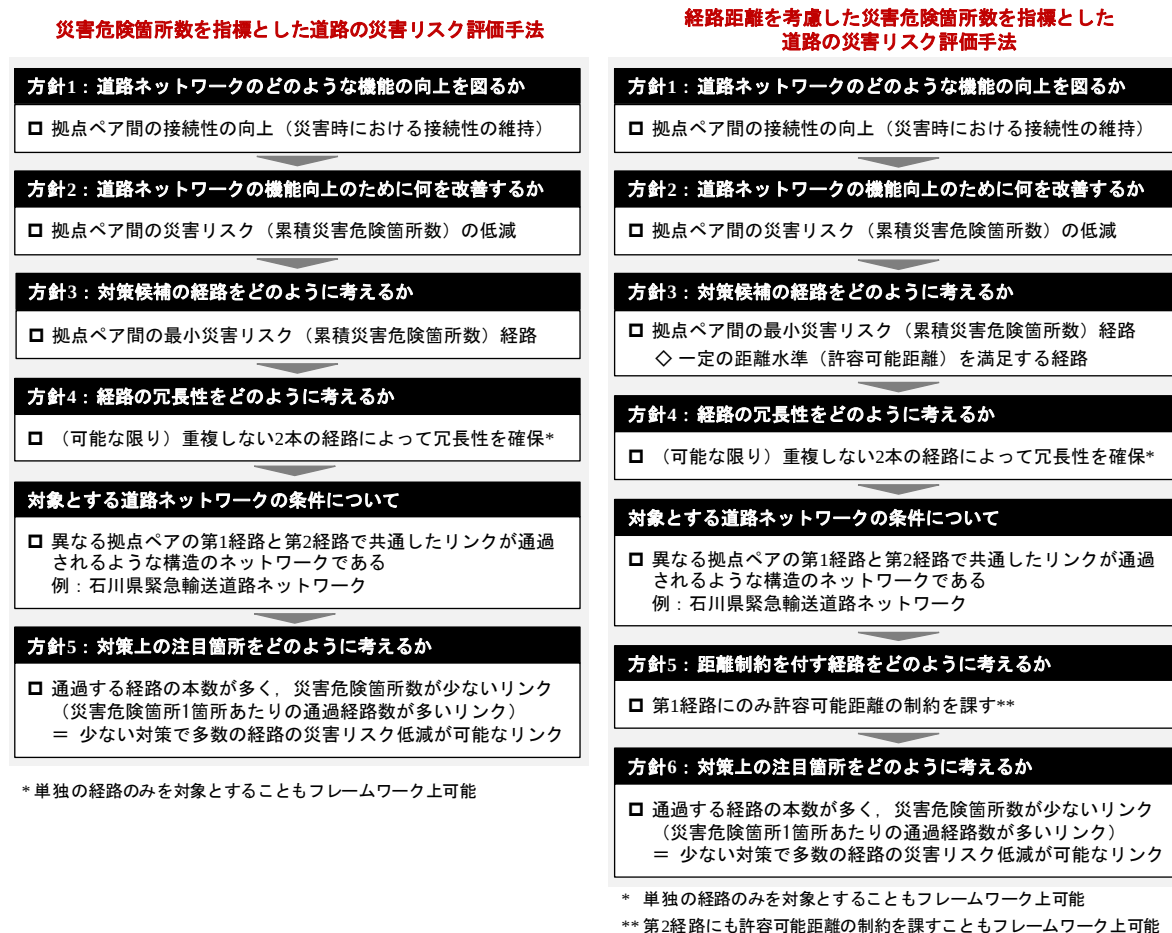


図-6.1 提案した道路の災害リスク評価手法の適用条件チェックシート

6.3 今後の課題

6.3.1 災害危険箇所数を評価指標とした道路ネットワークの評価手法としての課題

(1) 対策上着目すべきリンクの評価に関する課題

本研究では、少ない対策箇所でより多くの経路の災害リスクを減少できることを意図して対策注目度指標を提案した。一方で、対策を要する災害危険箇所数の大小に依らず、最も災害リスクを低減できるようなリンクに対策上着目するという考えをとることもできる。このように、道路防災対策上の着眼点として他にどのようなものがあり、さらにそれと災害危険箇所がどのように対応付けられるかを整理することが必要である。これによって、道路防災対策の検討・立案の自由度が拡大し、道路ネットワーク評価手法のさらなる深度化への寄与が期待される。

(2) 災害危険箇所・災害危険箇所数指標の改良・拡張に関する課題

本研究では災害危険箇所はその要素に依らず、すべて等しく 1 単位の災害危険箇所として扱った。しかし、対策の容易さや道路被害を生じる危険性など、本来は要素ごとに性質が異なるはずである。要素別の重みの検討や、単純な箇所数での災害リスクの定義からの脱却など、評価指標としての改良・拡張が必要である。

(3) 災害危険箇所の設定方法に関する課題

本研究では災害危険箇所の具体的な設定方法として 3 つの事例を示した。しかし、道路被害のリスクがあると考えられる箇所はこれら 3 事例に留まらない。より効果的な道路防災対策を実現するためには、どのような要素を災害危険箇所として設定すべきであるかという議論が必要である。このためには、過去の自然災害での道路被害について、どのような種類の、どのような条件を持つ道路構造物が被害を受けたのか分析し、災害危険箇所の判断条件を整理する必要がある。また、この判断条件をどのようなデータから取得できるかの検討も必要である。

6.3.2 災害時を対象とした道路ネットワークの評価手法の運用方法に関する課題

本研究では手法の運用方法に関する議論は扱っていない。しかし、第 1 章に述べたように、運用方法の工夫次第で、より効果的な分析結果を得られる可能性は大いにある。このことから、効果的な運用方法の検討も重要な課題と言える。例えば、拠点が必要とされる時間軸を考慮した拠点ペア設定や、拠点として設定すべき施設の種類や規模に関する検討などが考えられる。

6.3.3 道路の強化以外の対策手段の適用に関する課題

本研究では対策手段としてリンクの強化に着目した。一方で、リンクの強化だけで全ての備えを行なうことはできず、他の対策手段との併用が欠かせない。例えば、ノードの新設や移転（防災拠点の新設・移設）によって、リンクの強化を経ずに拠点ペアの機能を高めるという方向性もありうる。本研究で提案した災害危険箇所という考え方が、このような方向性での拡張性を有するのかなという点も含め、今後検討されるべき課題であると考えている。

謝辞

本論文は、筆者が金沢大学大学院自然科学研究科 環境デザイン学専攻 博士後期課程在学中に行ってきた研究成果を博士論文としてまとめたものです。本論文をとりまとめるにあたり数多くの方々のご協力・ご支援を受けたことに厚く御礼を申し上げる次第です。

主査の高山純一先生（金沢大学理工研究域地球社会基盤学系教授）には研究室ゼミやドクターゼミ，学会活動や講演会など様々な場面において，数多くのご指導とご助言を賜りました。筆者が金沢大学交通系研究室に配属されてから6年間，高山先生からは研究活動に留まらず，本当にたくさんのご指導を賜りました。そして何より，博士後期課程最後の1年間におきましては，筆者個人の都合で大変なご迷惑をおかけし続けたにも関わらず，最後まで一切私を突き放すことなく，博士論文として研究成果を取りまとめる瞬間まで導いていただきました。感謝の念に堪えません。

副査の藤生慎先生（金沢大学理工研究域地球社会基盤学系准教授）には，本論文におけるご指導はもちろん，日々の研究活動，研究室活動に留まらず私生活に至るまで数え切れない場面でたくさんのご指導を賜りました。様々な研究プロジェクトに関わらせていただき，学内外の様々な方々と交流する機会をたくさん与えていただきました。その1つ1つがとても貴重な経験であり，筆者にとってかけがえのない財産です。また，藤生先生の研究者としての姿，指導者としての姿は筆者にとって非常に印象深いものでありました。理想とするその背中に一歩でも迫れるよう，精進を重ねてまいります。

近田康夫先生（金沢大学理工研究域地球社会基盤学系教授），高山雄貴先生（同地球社会基盤学系准教授）には，ご多忙の中，本論文の副査をご担当いただきました。審査会の際には本論文の位置付けに関する重要なご指摘をいただき，深く感謝申し上げます。高山雄貴先生には月1度のドクターゼミの際に，本研究を進行させるにあたり非常に多くの重要なご指摘・ご指導を賜りました。重ねて感謝申し上げます。近田康夫先生には，博士前期課程在学時より研究会等で研究の方向性についての重要なご示唆をいただきました。重ねて感謝申し上げます。

高田和幸先生（東京電機大学理工学部理工学科 建築・都市環境学系 教授）には，ご多忙の

中、本論文の外部審査委員をお引き受け頂くとともに、本論文改善の方向性について多くの重要なご指摘をいただきました。深く感謝申し上げます。高田先生には本論文に留まらず、学会等で何度もご質問やご意見をいただくとともに、研究の方向性についてご示唆をいただきました。重ねて感謝申し上げます。

塩崎由人先生（金沢大学大学院自然科学研究科特任助教）には1年間という非常に短い期間ではありましたが、研究室のゼミの場で何度も議論をさせていただき、自らの研究と向き合う上で非常に良い刺激をいただきました。感謝申し上げます。中山晶一郎先生（同理工研究域地球社会基盤学系教授）と山口裕通先生（同理工研究域地球社会基盤学系助教）にはドクターゼミを通じて、何度も重要なご指摘をいただきました。深く感謝申し上げます。池本良子先生（同理工研究域社会基盤学系教授）には相談教員として、学生面談を通じて大学生生活面でのご相談に乗っていただきました。深く感謝申し上げます。また、学会活動を通じて多くの先生方より貴重なご意見・ご示唆を賜りましたことに深く感謝申し上げます。

事務補佐員の尾上早知子様、藤生研究室秘書の牛江真紀子様には、筆者の研究活動を影から力強く支えていただきました。尾上様と牛江様のご尽力なしには私の研究室生活は成り立ちませんでした。深く感謝申し上げます。

研究室内では、修士課程、学部学生の皆様には大変お世話になりました。博士2年の南貴大君、小池光右君、博士1年の森崎裕磨君とは同じ博士後期課程の学生として、日々の研究室運営をはじめ様々な場面で大変お世話になりました。また、時には悩み相談にものっていただき、筆者の心の支えとなっておりました。深く感謝申し上げます。また、災害危険箇所について共同で研究活動を行った石川県土木部の岡田真由子さん（金沢大学理工学域環境デザイン学類卒業）には、データ整理・分析等で多大なご協力をいただきました。感謝申し上げます。また、社会人学生の小橋川嘉樹様（株式会社電通デジタル）と形屋陽一郎様（株式会社日本海コンサルタント）にはドクターゼミや学会活動を通じて多くのご助言を賜りました。深く感謝申し上げます。特に小橋川様には研究活動を通じて多様なデータの収集・分析手法について学ばせていただきました。重ねて感謝申し上げます。岡山県総合政策局統計分析課の熊谷成則様（当時、金沢大学研究員）には、筆者も携わらせていただいた研究プロジェクトの遂行にあたり大変お世話になりました。プロジェクトの進行管理のみならず、筆者の個人的な事情にも親身になって相談にのっていただき、プロジェクトの完遂まで導いていただきました。深く感謝申し上げます。そして、筆者の研究室生活は、多くの先輩・同級生・後輩の皆様なくしては成り立ちえ

ませんでした。多くの皆様に研究活動を支えていただきましたことに深く感謝申し上げます。

研究室外では、学部3年時編入の頃からの同期である芹川由布子さん（現松江工業高等専門学校環境・建設工学科助教）には、研究室生活に悩み、疲れ果てていた頃に何度も相談にのっていただきました。芹川さんがいなければ、途中で諦めずにここまで至ることはできなかったと確信しています。この場をお借りして深く感謝申し上げます。森田哲夫先生（前橋工科大学工学部社会環境工学科教授）には筆者が群馬工業高等専門学校在籍時の指導教官として、筆者が研究者としてこの世界に飛び込むきっかけを与えていただくとともに、久しぶりにお会いした際には筆者の進路を気にかけていただきました。深く感謝申し上げます。

本研究を遂行するにあたり、科学研究費補助金特別研究員奨励費（代表：大澤脩司，課題番号：19J12627）の助成を受けました。ここに記し、感謝申し上げます。

ここにお名前を挙げるができなかった多くの方々からも、様々なご指導・ご協力をいただきました。本論文の執筆を支えてくださった全ての方々に、重ねて感謝申し上げます。

最後に、群馬高専卒業当時は、「大学を学部で卒業して地元で就職する」と宣言して金沢大学へ編入学したにも関わらず、金銭的な負担の少くない博士前期課程・博士後期課程への進学に一切反対することなく「やりたいことを全力でやれ」と背中を押してくださり、そして常に筆者の研究活動を暖かく見守り、応援し、筆者の心の支えでいてくれた父 健二、母 恵美子、姉 由香里に心からの感謝の気持ちを伝えたいと思います。本当にありがとうございました。

2020年3月

大澤 脩司